

INGRID CAROLINI CEZÁRIO

**ESTUDO EXPERIMENTAL E MODELAGEM NUMÉRICA DE
CAMPOS ELETROMAGNÉTICOS DE UMA FONTE CHAVEADA
DE BAIXA POTÊNCIA**

FLORIANÓPOLIS 2012.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
EM ENGENHARIA ELÉTRICA

**ESTUDO EXPERIMENTAL E MODELAGEM NUMÉRICA DE
CAMPOS ELETROMAGNÉTICOS DE UMA FONTE CHAVEADA
DE BAIXA POTÊNCIA**

Dissertação submetida à Universidade Federal
de Santa Catarina como parte dos requisitos
para a obtenção do grau de Mestre em Enge-
nharia Elétrica

INGRID CAROLINI CEZÁRIO

Florianópolis, dezembro de 2012.

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Cezário, Ingrid Carolini
ESTUDO EXPERIMENTAL E MODELACEM NUMÉRICA DE CAMPOS
ELETROMAGNÉTICOS DE UMA PONTE CHAVEADA DE BAIXA POTÊNCIA /
Ingrid Carolini Cezário ; orientador, Adroaldo Raizer -
Florianópolis, SC, 2012.
84 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Elétrica.

Inclui referências

1. Engenharia Elétrica. 2. Compatibilidade
Eletromagnética. 3. Ponte Chaveada. 4. Campo Distante. I.
Raizer, Adroaldo . II. Universidade Federal de Santa
Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica.
III. Título.

ESTUDO EXPERIMENTAL E MODELAGEM NUMÉRICA DE CAMPOS ELETROMAGNÉTICOS DE UMA FONTE CHAVEADA DE BAIXA POTÊNCIA

INGRID CAROLINI CEZÁRIO

“Esta dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica, Área de Concentração em *Eletromagnetismo e Dispositivos Eletromagnéticos*, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós- Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Santa Catarina.”

Prof. Adroaldo Raizer, Dr.
Orientador

Prof. Patrick Kuo Peng, Dr.
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

Banca Examinadora:

Prof. Daniela Ota Hisayasu Suzuki, Dra. UFSC

Prof. Golberi de Salvador Ferreira, Dr. IFSC

Eng. Adriano Kieling Ries, Dr. CEBRA

***“A subtle thought that is in error
may yet give rise to fruitful inquiry that
can establish truths of great value.”***

Isaac Asimov

À minha mãe e minha irmã, Maria Gorete e
Virgínia, por acreditarem em mim quando
nem eu mesma acreditava.

AGRADECIMENTOS

A minha família, que sempre apoiou e incentivou minhas escolhas.

A Luciano Fontes e Silva, pelo amor, carinho e paciência.

Ao meu orientador, Prof. Adroaldo Raizer, pela oportunidade, assistência, conhecimento, incentivo e confiança.

Ao Prof. Mauricio Valencia Ferreira da Luz pelo conhecimento e pelo bom humor.

Aos meus amigos Adriano Régis, André Luís de Oliveira, Eliana Gonçalves e Rafael Luiz da Silva, que contribuíram muito para que este trabalho fosse realizado.

Aos amigos e colegas do GEMCO, em especial Felipe, Matheus e Valente, pela amizade, companheirismo, convivência, estímulo e contribuições.

Aos amigos do GRUCAD Afrânio, Daimon, Diego Botelho, Diego Prado e Sandro.

A ESSS, pela oportunidade de utilização dos softwares, e principalmente a Juliano Fujioka Mologni, pela ajuda e paciência.

A empresa CEBRA, em especial a Adriano Kieling Ries, por todo o auxílio prestado.

Ao suporte financeiro da CNPQ durante estes dois anos de trabalho.

Resumo da dissertação apresentada à UFSC como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica

ESTUDO EXPERIMENTAL E MODELAGEM NUMÉRICA DE CAMPOS ELETROMAGNÉTICOS DE UMA FONTE CHAVEADA DE BAIXA POTÊNCIA

Ingrid Carolini Cezário

Dezembro/2012

Orientador: Adroaldo Raizer, Dr.

Área de concentração: Eletromagnetismo e Dispositivos Eletromagnéticos.

Palavras-chaves: Compatibilidade Eletromagnética, Fonte chaveada, Campo distante.

Número de páginas: 84

RESUMO: Esta pesquisa aborda a conformidade entre medidas de campos eletromagnéticos radiados e os dados oriundos de simulação de um software comercial para uma fonte chaveada desenvolvida especialmente para este trabalho. Um conversor estático abaixador tipo *buck* foi desenvolvido e analisado a fim de ser testado conforme as normas vigentes de compatibilidade eletromagnética. Características não ideais do mesmo foram investigadas a fim de prover uma melhor base de informações e, por conseguinte, melhores resultados de simulação. Por fim, estes foram comparados com os valores medidos experimentalmente, possibilitando uma avaliação dos softwares utilizados. Os resultados obtidos foram satisfatórios com um erro médio de $\pm 7\%$ no espectro de frequência medido.

Abstract of Dissertation presented to UFSC as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master in Electrical Engineering

**ANALYSIS OF RADIO EMISSIONS FROM A SMPS DISCRETIZE,
AIMING THE STUDY OF ELETROMAGNÉTIC FAR FIELDS.**

Ingrid Carolini Cezário

December/2012

Advisor: Adroaldo Raizer, Dr.

Area of Concentration: Electromagnetism and Electromagnetic Devices.

Keywords: Electromagnetic Compatibility, switching power supply, far field.

Number of pages: 84

ABSTRACT: This research aims to evaluate the conformity between measurements of electromagnetic radiated fields and data arising from simulation of a commercial software for a switching power supply designed specifically for this study. A static control power buck converter was developed and analyzed in order to be tested according to current regulations on electromagnetic compatibility. Non ideal characteristics thereof were investigated in order to provide a better basis of information and therefore better simulation results. Finally, they were compared with those measured experimentally providing an assessment of the software used. The results were satisfactory with an average error of $\pm 7\%$ in the measured frequency spectrum.

SUMÁRIO

ÍNDICE DE FIGURAS.....	18
APRESENTAÇÃO	22
1. INTRODUÇÃO.....	24
1.1. SISTEMAS ELETRÔNICOS	25
1.1.1. PROBLEMAS CAUSADOS POR SISTEMAS ELETRÔNICOS.....	25
1.1.2. FONTES CHAVEADAS.....	26
1.1.3. A INTERFERÊNCIA ELETROMAGNÉTICA DAS FONTES CHAVEADAS.....	27
1.1.4. NÃO-IDEALIDADES DOS COMPONENTES ELETRÔNICOS.....	28
1.1.5. MODELO IBIS.....	32
1.2. COMPATIBILIDADE ELETROMAGNÉTICA.....	34
1.2.1. BREVE HISTÓRICO.....	34
1.2.2. AMBIENTE ELETROMAGNÉTICO.....	34
1.2.3. INTERFERÊNCIA ELETROMAGNÉTICA.....	34
1.2.4. IMUNIDADE E SUSCEPTIBILIDADE.....	35
1.2.5. FONTES E RECEPTORES DE EMI.....	35
1.2.6. INTERFERENCIA RADIADA E CONDUZIDA.....	36
1.3. NORMAS CISPR.....	37
1.4. MEDIDAS	37
1.4.1. CÉLULA GTEM	39
1.4.2. MEDIDAS	40
1.5. SOFTWARES.....	41
1.5.1. SIMULAÇÃO ELETRÔNICA.....	41
1.5.2. SIMULAÇÃO DE CAMPOS ELETROMAGNÉTICOS.....	42
1.6. CONCLUSÃO	42
2. MODELAGEM NUMÉRICA.....	43
2.1. PROTEUS.....	43
2.1.1. ISIS	44
2.1.2. ARES	44
2.2. SIWAVE.....	44
2.2.1. MÉTODOS NUMÉRICOS UTILIZADOS	45
2.2.2. INSERINDO COMPONENTES E NÃO IDEALIDADES	45
2.2.3. CÁLCULO DE PARÂMETROS S	45
2.3. DESIGNER.....	46

2.4. EXEMPLO DE APLICAÇÃO	47
2.4.1. DESENVOLVENDO UM ESQUEMÁTICO NO SOFTWARE PROTEUS - MÓDULO ISIS	47
2.4.2. DESENVOLVENDO UM LEIAUTE NO SOFTWARE PROTEUS - MÓDULO ARES	48
2.4.3. INSERINDO LEIAUTE NO SI WAVE	48
2.4.4. INSERINDO MODELO SI WAVE NO DESIGNER	49
2.4.5. REALIZANDO SIMULAÇÃO ELETRÔNICA NO DESIGNER.....	51
2.4.6. EXTRAINDO PARÂMETROS DE EXCITAÇÃO	52
2.4.7. CALCULANDO CAMPO DISTANTE.....	53
2.4.8. RESULTADO DE CAMPO DISTANTE	54
2.5. CONCLUSÃO	55
3. CIRCUITO DE APLICAÇÃO	56
3.1. FONTE CHAVEADA TIPO BUCK	56
3.2. MEDIDAS.....	61
3.2.1. MEDIDAS REALIZADAS COM OSCILOSCOPIO	61
3.2.2. MEDIDAS REALIZADAS NA GTEM	63
3.2.3. MODELAGEM DOS COMPONENTES ELETRÔNICOS ...	64
3.3. SIMULAÇÕES	67
3.4. CONCLUSÃO	74
4. RESULTADOS	76
4.1. RESULTADOS DE CAMPO ELÉTRICO DISTANTE	76
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	79
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	81

INDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 - Circuito equivalente de um resistor	28
Figura 1.2 - Resposta em frequência do modelo de resistor	29
Figura 1.3 - Circuito equivalente de um Capacitor.....	30
Figura 1.4 - Resposta em frequência do modelo de capacitor	30
Figura 1.5 - Circuito equivalente de um indutor	31
Figura 1.6 - Resposta em frequência do modelo de indutor	31
Figura 1.7 - Circuito equivalente de um diodo	32
Figura 1.8 - Elipse Típica para Teste de Emissões Radiadas (OATS)	38
Figura 1.9 - Célula GTEM – instrumento para medição de campo distante	40
Figura 1.10 - Ruído de Fundo da Câmara GTEM, 30MHz até 1GHz.	41
Figura 2.1 - Esquemático de uma fonte retificadora de meia onda	47
Figura 2.2 - Leiaute fonte retificadora de meia onda.....	48
Figura 2.3 - Leiaute fonte retificadora meia onda inserido no SI Wave.....	49
Figura 2.4 - Inserindo modelo do SI Wave no Designer	50
Figura 2.5 - Fonte modelada no Designer	50
Figura 2.6 - Sinal de entrada do transformador	51
Figura 2.7 - Tensão de entrada e saída do diodo retificador.....	52
Figura 2.8 - Configurações para extrair parâmetros de excitação	53
Figura 2.9 - Parâmetros para cálculo de campo distante	54
Figura 2.10 - Campo distante a 3 metros fonte retificador meia onda.....	55
Figura 3.1 - Conversor Buck	57
Figura 3.2 - Esquemático da fonte chaveada realizado no Software Proteus – Módulo Isis.....	58
Figura 3.3 - Leiaute da fonte chaveada realizado no Software Proteus – Módulo Ares.....	59
Figura 3.4 - Leiaute desenvolvido no Software Proteus módulo Ares - Visualização em três dimensões.....	60
Figura 3.5 - Protótipo fonte chaveada	60
Figura 3.6 - Sinal do pino 7 do CI SG 3524 - Onda dente de serra.....	61
Figura 3.7 - Sinal do pino 12/13 - Sinal PWM do CI SG3524.....	62
Figura 3.8 - Sinal de saída da fonte chaveada	62
Figura 3.9 - Localização da fonte chaveada (EUT) na câmara GTEM	63

Figura 3.10 - Medida de campo distante a 3m realizada na GTEM da fonte chaveada tipo Buck	64
Figura 3.11 - Fonte chaveada modelada no SI Wave	67
Figura 3.12 - Modelo gerado pelo SI Wave inserido no Designer	68
Figura 3.13 - Fonte modelada no Designer.....	71
Figura 3-15 - Pino 7- onda dente de serra simulado	73
Figura 3-16 - Pino 12/12 - Sinal PWM simulado	73
Figura 3.17 - Sinal de saída da fonte de alimentação simulado.....	74
Figura 4.1 - Comparação campo distante 3m medido e simulado.	77

LISTA DE SIGLAS E NOMENCLATURAS

A	Unidade Ampère
ANF	Ansoft® Neutral File
CISPR	<i>Comite International Special des Perturbations</i>
<i>Radioelectrique</i>	
dB	Unidade Decíbel
E	Campo elétrico
EMC	<i>Electromagnetic Compatibility</i>
EMI	<i>Electromagnetic Interferences</i>
EUT	<i>Equipment Under Test</i>
f	Frequência
F	Unidade Farad
G	Giga
GTEM	<i>Gigahertz Transverse Electromagnetic</i>
H	Campo Magnético ou a unidade Henry
Hz	Unidade Hertz
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
M	Mega
m	Unidade Metro
MagLab	Laboratório de Eletromagnetismo e Compatibilidade
<i>Eletromagnética</i>	
MOM	<i>Moments method</i>
OATS	<i>Open Area Test Sites</i>
PCB	<i>Printed Circuit Board</i>
RF	Radio Frequência
TEM	<i>Transverse Electromagnetic</i>
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina
V	Unidade Volt
V_{ef}	Tensão Eficaz ou RMS
W	Unidade Watt
μ	Permeabilidade Magnética ou unidade de Micro
σ	Condutividade Elétrica
ε	Permissividade Elétrica

APRESENTAÇÃO

Atualmente o homem busca conforto e comodidade para as ações do seu dia a dia. Para tanto são desenvolvidos cada vez mais produtos que facilitam a sua vida. A maioria destes está relacionada de alguma forma a eletrônica. Já com a evolução da eletrônica nas últimas décadas, os equipamentos estão cada vez mais compactos e desempenhando inúmeras funções.

Os componentes eletrônicos estão presentes em praticamente tudo, seja no telefone celular, aparelho televisor, no carro e até mesmo quando usamos o cartão de crédito. A maioria destes aparelhos funciona com alimentação em tensão contínua (CC) e para realizar esta transformação de tensão alternada (CA) para tensão contínua (CC) é necessário uma fonte de alimentação. Fontes lineares são fontes que operam na frequência da rede de energia elétrica (50 ou 60 Hz), constituída de um transformador, uma etapa retificadora e um filtro, no modelo mais simples. As fontes lineares possuem baixa eficiência e relação volume/peso elevada, fato este que motivou o uso de fontes chaveadas, que possuem elevada eficiência e relação peso/volume reduzida. Estas fontes estão presentes em inúmeros equipamentos, seja dentro do gabinete ou fora, e os principais motivos de utilização desta, estão relacionados ao custo e ao tamanho reduzido.

Por esses motivos, fontes chaveadas ou conversores estáticos começaram a ser mais utilizados e juntamente com sua utilização foi possível perceber que estes apresentam problemas de compatibilidade eletromagnética.

Esta pesquisa tem como objetivo principal o estudo do campo distante oriundo das emissões radiadas geradas por um protótipo de uma fonte chaveada. Os resultados das medidas dos ensaios de emissão radiada serão comparados com os modelos obtidos pelos softwares da Ansoft®, a fim de verificar se os resultados são aceitáveis. Isto será realizado em duas etapas distintas.

Na primeira etapa serão realizados ensaios de emissão radiada, com o intuito de verificar os efeitos do campo distante. Na segunda etapa será realizada modelagem da fonte chaveada nos *softwares* da Ansoft® para obter, através de métodos numéricos, os resultados de campo distante. Desta forma, será possível verificar se os modelos obtidos por estes *softwares*,

quando comparados às medidas dos ensaios de emissão radiada, nos fornecem resultados equivalentes.

Além disso, o trabalho visa o estudo da aplicação das técnicas utilizadas nos *softwares* como método de resolução de problemas eletromagnéticos para altas frequências.

Neste estudo, nosso interesse está voltado para as emissões radiadas. Para isso, serão realizados ensaios de emissão radiada no protótipo da fonte chaveada, a fim de verificar o seu comportamento com relação às normas de compatibilidade eletromagnética.

Este trabalho está dividido em cinco capítulos:

O capítulo atual posiciona o trabalho no contexto do laboratório de pesquisa, definindo seus objetivos. Apresenta também um breve histórico sobre compatibilidade eletromagnética, e suas principais definições, as equações de Maxwell e suas relações constitutivas, passando em seguida as condições de transmissão de campos na interface entre materiais distintos.

No capítulo dois são apresentados os *softwares* utilizados, desde a montagem do esquemático até a simulação de campos. Nos programas da Ansoft® os métodos numéricos usados são expostos também.

No terceiro capítulo o circuito de aplicação é apresentado, e são exibidos os métodos empregados para realizar as simulações e medidas, além de contar com um tópico específico sobre as dificuldades encontradas para realização dos ensaios e simulações.

Apresenta-se, no capítulo quatro, os resultados obtidos através dos *softwares*, comparando estes às medidas realizadas.

Finalmente, no capítulo cinco, são feitas as análises e discussões finais sobre o trabalho realizado e são apresentadas sugestões de estudos futuros.

1. INTRODUÇÃO

As fontes chaveadas não apresentam uma característica linear para a rede de distribuição, desta forma, devido aos processos de retificação da forma de onda de tensão da rede e do chaveamento da forma de onda de tensão CC, a fonte chaveada gera uma grande quantidade de componentes harmônicos.

Esses componentes harmônicos de frequência são prejudiciais ao sistema elétrico. Podem causar interferências [3], pois é possível que se propaguem por condução (via cabos de alimentação) e por radiação (propagação de ondas eletromagnéticas pelo ar).

A ocorrência de interferências foi inicialmente ignorada, pois se tratavam de casos isolados. Porém, à partir da década de 70, a indústria deu início a uma preocupação com os problemas gerados por interferências eletromagnéticas. Isto ocorreu devido ao início da produção em larga escala de equipamentos eletroeletrônicos que, de alguma maneira, degradam a forma de onda senoidal da rede de alimentação elétrica ou interferem com outros equipamentos.

Ainda nos anos 70, alguns especialistas começaram a estudar meios de reduzir tais interferências a níveis aceitáveis e tomaram conhecimento de normas que limitam a energia eletromagnética gerada por equipamentos que possam interferir em um receptor de rádio. Estas normas foram adaptadas e, atualmente, são utilizadas para limitar a energia eletromagnética gerada por qualquer equipamento eletroeletrônico [3].

Esta área do conhecimento, dedicada a fazer com que um equipamento funcione corretamente em seu ambiente (não gere interferências e nem seja atingido por elas), denomina-se Compatibilidade Eletromagnética – (*Electromagnetic Compatibility* – EMC) [3].

Neste capítulo serão apresentados os sistemas eletrônicos, em especial fontes chaveadas, bem como a compatibilidade eletromagnética e conceitos necessários para compreensão deste trabalho.

1.1. SISTEMAS ELETRÔNICOS

Devido a forte evolução da eletrônica nas últimas décadas, cada vez mais equipamentos eletrônicos são desenvolvidos para serem utilizados na solução de problemas e otimização de processos. Estes equipamentos e soluções são aplicados em diversas áreas como, por exemplo: informática, telecomunicações, transmissão de dados, medicina, educação, diversão, entre outros. Normalmente são alimentados a partir da rede alternada (CA) 220V/110V 50 ou 60Hz e utilizam internamente tensões contínuas (CC) [4].

Por isso, é necessário realizar a conversão da tensão da rede comercial de energia para as tensões internas. Inicialmente esta conversão era feita utilizando fontes lineares. Estas apresentam baixo rendimento e devido aos elementos magnéticos e capacitivos utilizados, possuem elevados peso, volume e custo. Assim, a necessidade de rendimentos maiores e da tendência natural de redução de características indesejáveis dos equipamentos eletroeletrônicos, acarretou na substituição das fontes lineares por conversores estáticos, também conhecidos como fontes chaveadas. Estas são apresentadas nas mais diferentes topologias, podem operar em frequências que comercialmente já ultrapassam centenas de kHz e potências que podem variar de miliwatts até kilowatts.[4]

A utilização dos conversores estáticos surgiu como uma grande solução para a otimização dos aparelhos onde fossem implementados. No entanto, com a intensidade do seu uso, percebeu-se que estes equipamentos apresentavam tanto isoladamente quanto em conjunto um problema de compatibilidade eletromagnética que provocava mau funcionamento em sistemas eletrônicos que estavam de alguma forma conectados a eles [5].

1.1.1. PROBLEMAS CAUSADOS POR SISTEMAS ELETRÔNICOS

Muitos problemas de compatibilidade eletromagnética têm sido originados na necessidade crescente de miniaturização e maior velocidade de processamento de dados.

Existe a necessidade de tempo de mudança de níveis de sinal menores. Para os projetistas que desejam apenas velocidade e um sinal de onda quadrada cada vez mais perfeito, isto é ótimo. No entanto, no que tange

compatibilidade eletromagnética, isso pode vir a ser prejudicial interferindo de forma negativa, podendo ocasionar perda de dados [15].

1.1.2. FONTES CHAVEADAS

Fontes de alimentação estão presentes no nosso dia a dia, fazendo parte de quase todos os eletrodomésticos, desde o carregador do telefone celular até a televisão ou microcomputador [21].

Elas passaram por vários processos evolutivos e, apesar das chamadas fontes lineares ainda serem encontradas frequentemente, as fontes chaveadas têm conquistado espaço nos dispositivos modernos devido as suas vantagens.

Características como menor volume e peso em comparação com as fontes com regulação linear justificam sua utilização nos mais variados sistemas eletrônicos [21].

Uma vez que as fontes chaveadas apresentam uma eficiência muito maior do que a de fontes de alimentação lineares, este tipo de fonte acabou por conquistar projetistas e fabricantes [23].

Apesar disso, elas são circuitos complexos que demandam um maior cuidado no projeto e implementação prática. A evolução das fontes chaveadas acontece tanto sob o aspecto do oferecimento de componentes com melhores características como pelo desenvolvimento da técnica de projeto e construção [20]. Embora devido ao fato de estarem presente em grande parte dos equipamentos eletrônicos e de atualmente serem muito utilizadas, o desenvolvimento e uso de fontes chaveadas ainda requerem alguns cuidados.

Mesmo de posse de um projeto confiável e estável, é possível constatar a presença de alguns problemas no que se refere à EMC. Quando realizamos uma análise de EMC de uma fonte chaveada, pode-se averiguar que uma variação da carga, ou seja, da quantidade de potência entregue pela fonte, influencia diretamente na emissão de campos eletromagnéticos radiados [24]. Neste estudo foram realizadas medidas com a fonte em aberto (sem carga) e com uma carga de 100Ω .

1.1.3.A INTERFERÊNCIA ELETROMAGNÉTICA DAS FONTES CHAVEADAS

Apesar dos benefícios das fontes chaveadas, no que tange a geração de interferência eletromagnética (EMI), problemas graves originados nas altas frequências de chaveamento e também nas transições nas formas de onda de tensão e corrente devem ser solucionados.

No entanto, a evolução da tecnologia e o aumento da frequência de chaveamento tem tornado ainda mais intensa a geração de EMI.

Essa questão tem despertado interesse nos estudos desta área, aumentando a quantidade de pesquisas de desenvolvimento de projetos de conversores eletrônicos de potência [22].

Em qualquer sistema eletrônico, ou nesse caso mais específico, numa fonte chaveada, a energia EMI pode ser convertida de conduzida para radiada, bem como o oposto também pode acontecer. Isso ocorre diversas vezes entre a geração e a medição. Se a EMI for conduzida num cabo, por exemplo, pode ser gerado um campo eletromagnético, que irá gerar um ruído radiado, que por acoplamento com outro condutor ou trilha, transforma-se novamente em ruído conduzido, entretanto em uma posição diferente no sistema. Sendo assim, qualquer condutor pode se tornar uma antena que recebe e emite sinais [5].

O ruído radiado é dividido em duas classes que dependem da forma como a energia é gerada. Pode ser de um campo magnético, gerado pelas variações de corrente nos condutores, ou de campo elétrico, causado pelas variações de tensão nas superfícies condutoras, ou ainda os dois ao mesmo tempo.

1.1.4. NÃO-IDEALIDADES DOS COMPONENTES ELETRÔNICOS

- Resistores: Os resistores são os componentes mais comuns em sistemas eletrônicos. Estes componentes são construídos, basicamente, de três formas:

- com composição de carbono;
- com um fio enrolado;
- com filmes finos.

Devido à técnica de construção, o resistor de filme fino tem valores mais precisos de resistência do que o resistor com composição de carbono, e tem menor indutância do que o resistor de fio [4].

Dependendo da técnica de construção, os resistores reais comportam-se de uma forma um pouco diferente da ideal em altas frequências. Um efeito mais significativo é representado pela indutância e pela capacitância dos terminais do elemento. Assim a função de transferência de um resistor pode ser expressa por (1.1) [4].

$$\vec{Z}(s) = \frac{\vec{V}}{\vec{I}} = L_{term} \frac{s^2 + \frac{s}{R \cdot C_{par}} + \frac{1}{L_{term} \cdot C_{par}}}{s + \frac{1}{R \cdot C_{par}}} \quad (1.1)$$

onde: $s = \sigma + j\omega$ (variável complexa).

C_{par} é a capacitância parasita

L_{term} é a indutância do terminal

A Figura 1.1 mostra um circuito equivalente de um resistor.

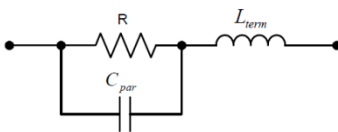


Figura 1.1 - Circuito equivalente de um resistor

É possível verificar que, para resistores de alta impedância a capacitância parasita é o efeito dominante no elemento. Assim, o modelo tem um comportamento representado por (1.2), (1.3) e (1.4) [4].

$$\text{resistivo para: } 0 \leq f < \frac{1}{2\pi RC_{par}} \quad (1.2)$$

$$\text{capacitivo para: } \frac{1}{2\pi RC_{par}} < f < \frac{1}{2\pi \sqrt{L_{term} C_{par}}} \quad (1.3)$$

$$\text{indutivo para: } \frac{1}{2\pi \sqrt{L_{term} C_{par}}} < f \leq \infty \quad (1.4)$$

A Figura 1.2 mostra o comportamento do módulo da impedância do resistor em função da frequência [4].

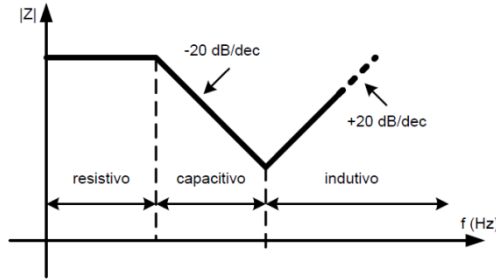


Figura 1.2 - Resposta em frequência do modelo de resistor

- Capacitores: Existem numerosos tipos de capacitores. Para a redução de perturbações eletromagnéticas, os capacitores típicos são o cerâmico e o eletrolítico [4]. Estes capacitores podem ser representados por um par de placas paralelas separadas por um dielétrico [4]. As perdas (por polarização e ôhmica) no dielétrico são representadas por uma resistência paralela R_{diel} . A resistência das placas é representada por R_{placa} . O capacitor tem uma certa indutância L_{term} e capacitância C . O circuito equivalente do capacitor consiste da combinação série de C e R_{placa} . A resistência de R_{placa} representa a Resistência Série Equivalente – SER (*Equivalent Series Resistance – ESR*) e é denotada como R_{RSE} . Desse modo, o modelo consiste numa combinação

série de C , L_{term} e R_{RSE} . A impedância desse modelo é apresentada nas Figuras 1.3 e a resposta em frequência em 1.4 [4].

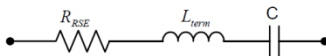


Figura 1.3 - Circuito equivalente de um Capacitor

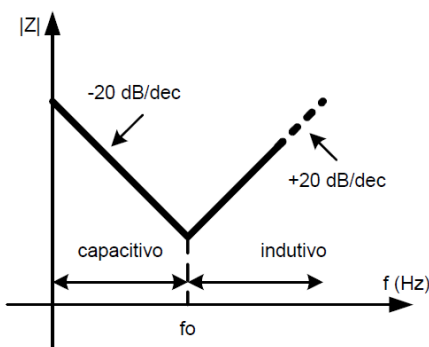


Figura 1.4 - Resposta em frequência do modelo de capacitor

- Indutores: A técnica de construção específica determinará os valores dos elementos parasitas no modelo do indutor não ideal [4]. O processo de enrolamento das bobinas dos fios na forma cilíndrica introduz o valor de resistência do fio bem como a capacitância entre as bobinas vizinhas. Isto produz elementos de capacitância parasita R_{par} e C_{par} no modelo não ideal. O indutor não ideal deve também incluir a indutância anexada dos terminais L_{term} , a qual é desprezada, pois seu valor é muito menor do que a indutância intencional do elemento. Do mesmo modo, a capacitância C_{term} é frequentemente menor do que a capacitância parasita C_{par} , podendo também ser ignorada. Assim, a impedância desse modelo é dada por (1.5) [4]

$$\vec{Z}(s) = \frac{\vec{V}}{\vec{I}} = R_{par} \frac{1 + \frac{s \cdot L}{R_{par}}}{s^2 \cdot L \cdot C + s \cdot R_{par} \cdot C_{par} + 1} \quad (1.5)$$

O circuito equivalente do indutor é apresentado na Figura 1.5, e a resposta em frequência na Figura 1.6 [4].

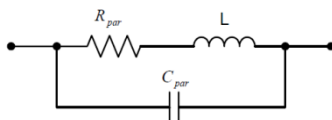


Figura 1.5 - Circuito equivalente de um indutor

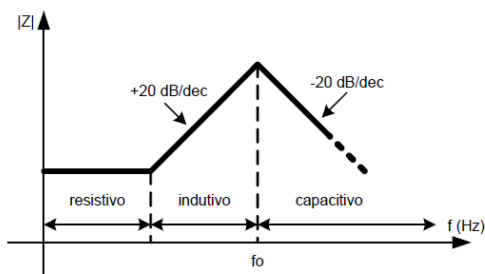


Figura 1.6 - Resposta em frequência do modelo de indutor

- Diodos: A representação ideal de um diodo é feita por uma chave aberta, que indica circuito aberto, na polarização reversa e fechada, um curto circuito quando na polarização direta [11]. Quando operam em altas frequências algumas características surgem na área de junção, principalmente devido às características dos materiais P e N. Se associarmos estes elementos a um modelo de diodo ideal podemos obter um fonte de tensão. Assim o diodo pode ser representado como na Figura 1.7.

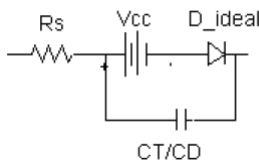


Figura 1.7 - Circuito equivalente de um diodo

Um diodo atua também como componente de comutação, já que no modelo ideal é um curto para correntes diretas e circuito aberto para correntes reversas [25].

A capacitância não é uma constante, ela varia de acordo com o estado de operação do diodo. Nos catálogos de fabricantes são fornecidas curvas das capacitâncias em função da tensão reversa e valores típicos.

- Efeitos dos terminais dos componentes: Um componente deve ser conectado ao circuito pelos terminais. Um dos fatores importantes que influenciam o comportamento em alta frequência dos componentes é o comprimento dos terminais de fixação dos mesmos [4]. Quando os terminais são mais longos que o necessário provocam desvio no comportamento ideal do componente em altas frequências. Essas alterações comportamentais normalmente ficam na faixa de frequência dos limites regulamentados, onde há a necessidade de que o componente comporte-se como esperado [4]. A separação e o comprimento dos terminais fazem com que o componente tenha, além do comportamento ideal, um elemento indutivo e um elemento capacitivo. Estes elementos em combinação com o componente podem causar um desempenho que é bastante diferente do esperado (ressonâncias) [4].

1.1.5. MODELO IBIS

Como mencionado no item anterior, os componentes possuem suas não idealidades, desde os mais simples até os mais complexos, como por

exemplo, os circuitos integrados. Internamente os circuitos integrados são compostos por diversos componentes, entre eles os transistores. Eles podem ser modelados utilizando os outros modelos apresentados de outros componentes.

Para desenvolver os modelos de componentes são realizados diversos ensaios com o intuito de coletar o maior número de informações possíveis. Estas informações somadas à análise de pesquisadores resultam em modelos numéricos. Estes modelos podem ser mais simples, no caso de componentes passivos, ou mais complexos, no caso de circuitos integrados. Os circuitos integrados exigem modelos mais precisos, pois têm em sua arquitetura interna outros componentes (diodos, resistores, transistores, etc.) além de espaço físico reduzido (compactado).

Por esta razão precisam de maior atenção e modelos específicos foram desenvolvidos para circuitos integrados, tratando individualmente cada CI, considerando suas particularidades e especificações.

Deste modo, alguns modelos foram desenvolvidos para circuitos integrados. Estes avaliam as não idealidades mencionadas previamente, de modo a disponibilizar ao usuário características que uma folha de dados de um componente não forneceria. Entre estes modelos, o mais conhecido é o modelo IBIS.

IBIS (*Input/output Buffer Information Specification*) é um modelo que os fabricantes de circuitos integrados usam para disponibilizar informações sobre os circuitos integrados para seus clientes potenciais, sem revelar a propriedade intelectual da sua aplicação e sem necessidade de chaves de criptografia de propriedade [3]. Esse modelo é gerado no formato de texto e consiste de uma série de tabelas que informam dados de tensão, corrente, operação em determinada frequência, capacitâncias, indutâncias resistências, tempos chaveamento interno de circuitos, temperatura de operação ideal, ruído eletromagnético gerado, entre outras informações.

1.2. COMPATIBILIDADE ELETROMAGNÉTICA

1.2.1. BREVE HISTÓRICO

Nos anos 80 as preocupações relacionadas à compatibilidade eletromagnética foram eminentes e marcadas pelo interesse de que as emissões eletromagnéticas em equipamentos eletroeletrônicos estivessem dentro dos limites estabelecidos pelas normas. O maior propósito era garantir que a energia eletromagnética lançada pelos equipamentos eletrônicos não tornasse o ambiente inóspito sob o ponto de vista eletromagnético [1].

Com a expansão do mercado eletroeletrônico, e a consequente inserção de equipamentos com este princípio de funcionamento em diversas áreas de aplicação, os níveis de energia eletromagnética liberados nos ambientes tornaram-se crescentes. Desde então, fenômenos de interferência eletromagnética (EMI) passaram a ser observados com mais atenção. Para solucionar estes problemas, durante a década de 90, o termo imunidade eletromagnética passou a ser bastante difundido e também incorporado como um requerimento para testes de compatibilidade eletromagnética. Desta forma o conceito moderno de compatibilidade eletromagnética firmou-se e dura até hoje [1].

1.2.2. AMBIENTE ELETROMAGNÉTICO

O Conceito de Ambiente Eletromagnético pode ser entendido como o resultado do funcionamento de diversos aparelhos, equipamentos ou sistemas somado ao ruído ambiente no qual estes aparelhos, equipamentos ou sistemas funcionam [2].

1.2.3. INTERFERÊNCIA ELETROMAGNÉTICA

É a degradação do desempenho de um equipamento, canal de transmissão ou sistema; causada por uma perturbação eletromagnética.

Nota: Os termos “perturbação eletromagnética” e “interferência eletromagnética” designam, respectivamente, causa e efeito, e não devem ser utilizados indiscriminadamente [3].

1.2.4. IMUNIDADE E SUSCEPTIBILIDADE

Os níveis de interferência eletromagnética (EMI) são definidos internacionalmente por normas que estabelecem o conceito de compatibilidade eletromagnética [13].

A susceptibilidade é descrita pela IEC como “a incapacidade de um dispositivo, equipamento ou sistema de operar sem degradação de desempenho, quando na presença de perturbações eletromagnéticas” [12].

Susceptibilidade e Imunidade são conceitos complementares. A definição de imunidade pode ser obtida substituindo o termo incapacidade por capacidade na definição de susceptibilidade. Então, imunidade pode ser descrita como “a capacidade de um dispositivo, equipamento ou sistema de operar sem degradação de desempenho, quando na presença de perturbações eletromagnéticas” [12].

1.2.5. FONTES E RECEPTORES DE EMI

São diversas as fontes de emissões eletromagnéticas, naturais e artificiais (produzidas pelo homem). Sabemos que as descargas atmosféricas, o fechamento e abertura de relés, o acionamento de motores elétricos CC, os reatores (*ballasts*) de lâmpadas fluorescentes, etc. geram ondas eletromagnéticas ricas em conteúdo espectral.

As causas básicas de EMI podem ser agrupadas em diversas categorias:

- Sobrecarga Fundamental
- Ruído Externo
- Emissões Espúrias
- Transientes Elétricos
- Variações de Tensão
- Descarga Eletrostática

Os distúrbios podem afetar a fonte de alimentação de um equipamento como também atravessá-la, causando degradação temporária ou permanente do funcionamento daquele dispositivo em particular.

1.2.6. INTERFERENCIA RADIADA E CONDUZIDA

A interferência conduzida é o mecanismo pelo qual as interferências são levadas para dentro ou para fora de um sistema por meio de condutores metálicos ou elementos parasitas. Até pouco tempo atrás a maior preocupação relacionada à interferência era o ruído injetado na rede de alimentação. Isso porque a rede de alimentação atua como meio de propagação deste ruído. Porém, os conversores estáticos injetam ruído na carga que alimentam e servem como meio de propagação entre a rede de alimentação e a carga. Esta comprovação, acompanhada do crescente uso dos conversores estáticos, fez com que houvesse um crescimento e intensificação nos estudos e modelagem dos mesmos, como gerador, receptor e meio de transmissão de interferência eletromagnética [14].

A interferência radiada ocorre quando o ruído eletromagnético é levado para dentro ou para fora de um sistema por meios não metálicos como, por exemplo, o ar. Estes ruídos podem ser oriundos de correntes que ‘circulam’ por trilhas, cabos, terminais de semicondutores, em caminhos fechados (*loop*) gerando campos eletromagnéticos. Sua intensidade depende de fatores como corrente (amplitude e frequência), comprimento das trilhas, comprimento de cabos, área de caminho fechado, etc. [14].

1.3. NORMAS CISPR

As normas de emissão eletromagnética, pertinentes a este trabalho, são em sua grande maioria desenvolvidas e atualizadas pelo Comitê Internacional Especial de Perturbações Radioelétricas (CISPR), que determina quantitativamente, os níveis de emissão eletromagnética que cada tipo de equipamento sob teste (EST) pode gerar. Dentre estas normas, duas se destacam pelo seu emprego mais frequente e foram consideradas neste trabalho:

- CISPR 11 - *Industrial, Scientific and Medical (ISM) Radio-Frequency Equipment -- Electromagnetic Disturbance Characteristics -- Limits and Methods of Measurement* [8];
- CISPR 22 - *Information Technology Equipment -- Radio Disturbance Characteristics -- Limits and Methods of Measurement* [9].

1.4. MEDIDAS

O local de testes de campo aberto (OATS - *Open Area Test Site*) é um ambiente de medição prescrito na norma de prova de emissões radiadas.

De acordo com a norma CISPR-16, a OATS deve ser plana, livre de linhas aéreas ou estruturas reflexivas nas proximidades, suficientemente grande para instalar a antena a uma distância adequada do EUT (*Equipment Under Test*) de estruturas reflexivas (ou seja, aqueles feitos de material essencialmente condutor). A OATS ainda deve prever um plano de massa metálico horizontal.

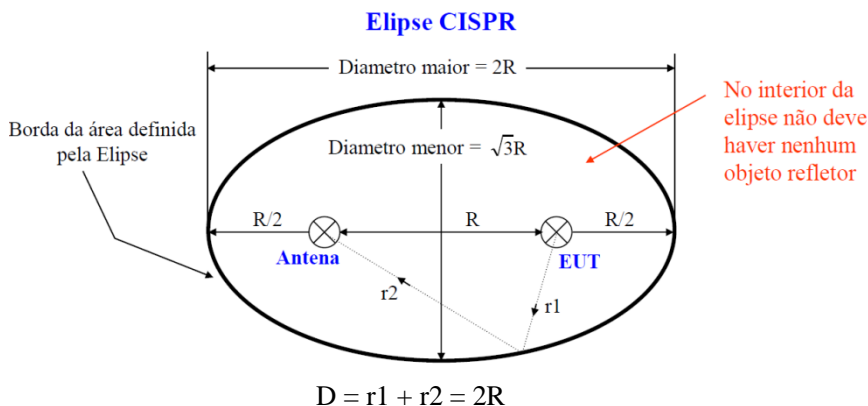


Figura 1.8 - Elipse Típica para Teste de Emissões Radiadas (OATS)

Os métodos descritos pela CISPR 16 são considerados como medição em condições de espaço-livre ou ensaios de campo aberto (OATS – *Open Area Test Sites*), realizado normalmente para distâncias de 3 ou 10 m entre o equipamento sob teste e a antena receptora. É importante ressaltar que para implementação deste método são adotadas algumas simplificações que presumem a consideração de uma geometria planar e condições de campo-distante. A elipse típica de ensaio de campo aberto definido pela CISPR 11 [8] está ilustrada na Figura 1.8. Na prática é interessante que exista uma área livre de objetos refletoras ao redor desta elipse. Ainda é recomendado em diversas instalações que o ambiente de ensaio possua também blindagem e atenuadores, para evitar respectivamente a influência de sinais externos na medição e minimizar a reflexão no interior do ambiente de teste, que possam, por ventura, interferir nos resultados obtidos [1].

Embora a configuração de campo aberto (OATS) seja normalmente escolhida, outras configurações que também simulam a condição de espaço-livre são igualmente utilizadas para fins de avaliação da conformidade em ensaios de emissão radiada, como por exemplo, a utilização de células GTEM (*Gigahertz Transverse Electromagnetic*) ou de câmaras semi-anecóicas [29] [8] [1].

1.4.1. CÉLULA GTEM

A medição de campos distantes, objeto desta pesquisa, são as medidas de emissão consideradas nas distâncias de 3 e 10 metros, estabelecidas pelas normas CISPR 11 e CISPR 22 .

No Maglab, Laboratório de Eletromagnetismo e Compatibilidade Eletromagnética da Universidade Federal de Santa Catarina, estes tipos de medidas podem ser executados de duas formas. Numa primeira, o equipamento sob avaliação é inserido no interior de uma célula GTEM, e esta, conectada a um *receiver*, envia os valores de tensão acoplados no seu interior, oriundos da fonte emissora, para um computador provido do software que irá estabelecer o valor de emissão eletromagnética radiada para as distâncias pretendidas. No caso da célula GTEM, o equipamento sob teste é considerado um conjunto de dipolos elementares, e através de um algoritmo específico, o software converte as características mensuradas no valor de campo distante procurado. [6]

De modo análogo, o segundo método para se obter os campos distantes de um equipamento qualquer, é analisando os campos emitidos pelo mesmo, dentro de uma câmara *stripline*. A câmara, com dimensões menores que a célula GTEM, funciona basicamente com o mesmo princípio, excetuando-se que a relação da tensão medida e o campo radiado nas distâncias definidas é outra, entretanto, provendo o mesmo resultado.

Na Figura 1.9 abaixo, é apresentada a célula GTEM, disponível no laboratório Maglab para medir os valores de campo distante.



Figura 1.9 - Célula GTEM - instrumento para medição de campo distante

1.4.2. MEDIDAS

As medidas foram realizadas no laboratório MagLab, acreditado ao Inmetro, numa célula GTEM.

Foram executadas na faixa de frequência de radiação definida pela norma (CISPR 22), isto é, de 30MHz a 1GHz e para a distância de 3m. Uma medida de ruído de fundo foi executada com a finalidade de garantir que não havia perturbações que pudessem interferir no resultado da medição.

A imagem do ruído de fundo pode ser observada na Figura 1.10, onde o eixo Y é referente ao valor de amplitude do campo elétrico e se dá em $\text{dB}\mu\text{V/m}$, e o eixo X corresponde à faixa de frequência de radiação do circuito.

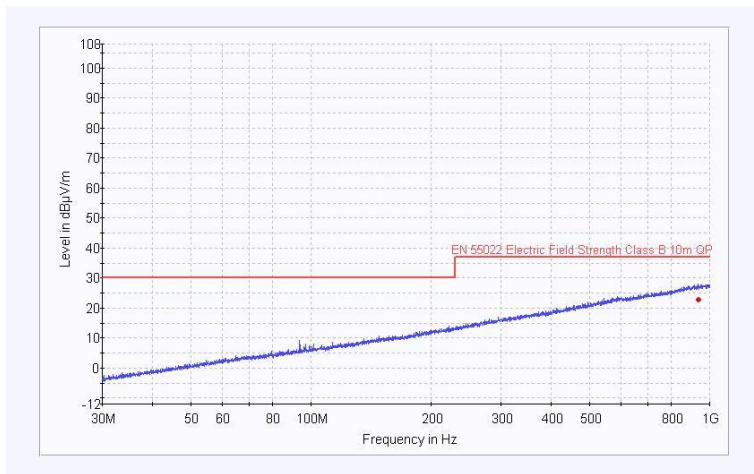


Figura 1.10 - Ruído de Fundo da Câmara GTEM, 30MHz até 1GHz.

1.5. SOFTWARES

1.5.1. SIMULAÇÃO ELETRÔNICA

É possível avaliar um sistema eletrônico através de simulações numéricas. Para tanto foram selecionados softwares de acordo com suas funcionalidades e que fossem compatíveis entre si.

Estes softwares são capazes de simular o funcionamento eletrônico de um sistema, de modo a permitir a inserção de dados significativos para ter uma resposta mais próxima das medidas realizadas na célula GTEM. Entre estas características estão as não idealidades dos componentes eletrônicos, frequência de operação, material utilizado na placa de circuito impresso, modelo Ibis e cálculos dos parâmetros de reflexão.

Os softwares de simulação numérica utilizados foram Proteus, por ser uma interface de fácil utilização e também por ser compatível com os outros softwares, SI Wave e Designer.

1.5.2. SIMULAÇÃO DE CAMPOS ELETROMAGNÉTICOS

Após a realização das simulações eletrônicas, que levam em conta cada detalhe do funcionamento do circuito, tem-se como resultados diversos dados. Com estes é possível calcular os campos eletromagnéticos tanto na forma de animações como na forma de gráficos. Para isso foram utilizados mais uma vez os softwares da Ansoft® Designer e SI Wave [17][18].

1.6. CONCLUSÃO

Neste capítulo foram apresentados sistemas eletrônicos, com foco em fontes chaveadas, os problemas que eles podem gerar ao que se refere a EMI e os conceitos básicos associados.

A filosofia e os princípios da EMC foram abordados bem como as normas que regulam a EMC, CISPR 11 e 22, para emissões conduzidas e radiadas.

Para finalizar este capítulo, foram introduzidas as formas de como será realizada a modelagem numérica que efetuará as simulações eletrônicas e de campos eletromagnéticos. Entretanto os softwares utilizados e seus métodos de modelagem numérica, bem como suas funcionalidades serão apresentados no capítulo seguinte.

2. MODELAGEM NUMÉRICA

As simulações eletrônicas surgiram com o intuito de avaliar o comportamento dos circuitos, sistemas e equipamentos sem que estes precisassem ser efetivamente construídos. Os esforços necessários para realizar uma modelagem mais complexa são justificados quando o desejo é avaliar e redefinir aspectos de concepção (projeto e desenvolvimento) de um determinado equipamento [26]. Normalmente este ponto está relacionado a adequar o dispositivo modelado a fim de alcançar a sua conformidade com normas técnicas ou com objetivos mais específicos de projetos em EMC [1][16].

Neste estudo as simulações numéricas estão voltadas para os dados eletrônicos e os de campo eletromagnético, e para tal são necessários métodos numéricos para realizar os cálculos (MoM e MEF).

O capítulo 2 apresentará os softwares utilizados para este estudo. No desenvolvimento do capítulo será apresentada desde a construção do esquemático, realização do leiaute, até a parte de métodos numéricos para cálculo de campo distante. Além disso, serão explanadas as formas de utilização de cada software até chegar ao resultado desejado e o cálculo de campos eletromagnéticos. Para isso utilizaremos um exemplo simples, uma fonte de meia onda.

2.1. PROTEUS

Este *software* foi escolhido devido as suas facilidades de utilização, aquisição (licença gratuita) e também a sua compatibilidade com os outros *softwares* que realizarão o cálculo numérico de campos eletromagnéticos.

O Proteus combina captura esquemática e simulação de circuitos e *design* de leiaute de placas de circuito impresso para fazer um projeto completo de eletrônica[19]. É dividido em dois módulos: Isis e Ares. Estes realizam a simulação eletrônica de um circuito e criação de leiaute respectivamente. Na sequência são apresentados maiores detalhes de cada módulo.

2.1.1. ISIS

ISIS é a base do sistema PROTEUS e é mais do que apenas outro pacote de esquemas. Ele combina um ambiente de *design* potente com a capacidade de controlar a maioria dos aspectos da aparência de desenho [19].

Neste módulo do software Proteus realiza-se a montagem e simulação eletrônica do circuito tratando os componentes como modelos ideais, ou seja, desconsiderando suas não idealidades. Este permite selecionar o encapsulamento do componente para que posteriormente, na fase de exportação de dados para o módulo Ares, não exista a necessidade de alterações.

2.1.2. ARES

O módulo Ares comporta a construção de leiautes para placas de circuito impresso de camada simples ou múltiplas. Permite a exportação de dados do módulo Isis para iniciar o projeto, já reconhecendo o valor dos componentes e encapsulamento de cada um.

2.2. SIWAVE

A escolha deste software de cálculo numérico foi definida por suas inúmeras facilidades de inserção de dados referentes aos componentes eletrônicos, bem como suas não idealidades e definições de materiais utilizados na placa de circuito impresso a ser analisada.

O software SI Wave faz a análise de placas de circuito impresso (PCB) e de circuitos integrados (CI) prevalentes nos produtos eletrônicos mais modernos. A opção de utilizar este software foi devido ao fato ser uma ferramenta poderosa que permite a análise de campo próximo e de campo distante bem como a análise de sinais eletrônicos. Estas análises auxiliam na identificação de problemas de potência e de integridade de sinal [17].

2.2.1. MÉTODOS NUMÉRICOS UTILIZADOS

Para realizar simulações eletrônicas com o intuito de avaliar o comportamento dos circuitos, tanto referente aos dados eletrônicos quanto aos de campo eletromagnético, são necessários métodos numéricos para realizar os cálculos.

Para isso, o SI Wave utiliza dois métodos diferentes: o Método dos Momentos (MoM) e o Método de Elementos Finitos 2D (MEF).

2.2.2. INSERINDO COMPONENTES E NÃO IDEALIDADES

Como sabemos componentes possuem não idealidades. Um resistor comum tem seu valor resistivo com uma tolerância de $\pm 5\%$. No entanto, dependendo da frequência de operação temos outras parcelas agregadas, parcelas indutivas e capacitivas.

Em muitos casos essas parcelas causam o funcionamento incorreto de um circuito, caso não sejam previstas na fase do projeto.

Para prever estas parcelas “indesejáveis”, podemos utilizar um equipamento chamado ponte RLC. Este equipamento permite que sejam medidos os valores de resistores, capacitores e indutores, inserindo a frequência na qual o circuito irá operar. O mesmo ainda fornece tanto o valor do componente como também as parcelas de não idealidades agregadas para as diversas frequências de operação.

2.2.3. CÁLCULO DE PARÂMETROS S

Parâmetros S (em inglês *Scattering Parameters*) são os elementos de uma matriz que descrevem o comportamento elétrico de redes de energia elétrica quando submetidos a vários estímulos por sinais elétricos [28]. Os parâmetros S são membros de uma família de parâmetros semelhantes. Exemplificando estes parâmetros temos: Y-parâmetros, parâmetros Z , H-

parâmetros, T-parâmetros ou ABCD-parâmetros [10][27]. O que diferencia o Parâmetro S dos demais é que este não usa condições de circuito aberto ou de curto circuito, ao invés disso, os valores de cargas encontradas são utilizados.

Trata-se da forma de dispersão pela quais correntes e tensões percorrem linhas de transmissão, ou neste caso trilhas de circuito impresso, que encontram uma descontinuidade causada pela inserção de uma nova rede numa linha de transmissão. Isto é equivalente ao encontro de uma onda com uma impedância que difere da impedância característica da linha.

Muitas propriedades elétricas de componentes (indutores, capacitores e resistores) podem ser expressas através dos parâmetros S, como ganho, perda de retorno, VSWR, coeficiente de reflexão e amplificador de estabilidade.

Deste modo, mais características próximas às reais são agregadas aos dados de simulação para realizar o cálculo numérico.

2.3. DESIGNER

O software Designer, assim como o SIWave, foi selecionado por permitir que muitas características reais de componentes sejam inseridas, incluindo o modelo IBIS para circuitos integrados, o que possibilita um resultado próximo do mesmo tipo de medidas realizadas no protótipo real. Além disso, por estes *softwares* serem do mesmo fabricante, eles se comunicam entre si trocando informações que contribuem para um resultado final melhor no cálculo de campos eletromagnéticos.

O Designer é um esquema integrado e de gestão de design *front-end* para as tecnologias Ansoft®. Designer é a base para um fluxo de projeto de alta precisão que permite aos usuários modelar e simular um esquema analógico complexo, RF, e de sinal misto bem como a análise de integridade de sinal. O *software* inclui ainda captura de esquemáticos, edição de *leiaute*, geração de lista de componentes utilizados, visualização de dados e ferra-

mentas de análise [18]. Os métodos numéricos utilizados são os mesmos do SI-Wave, métodos de elementos finitos e dos momentos. De acordo com a resposta solicitada pelo usuário, o próprio software opta pelo método que apresentará a melhor resposta.

2.4. EXEMPLO DE APLICAÇÃO

Para um melhor entendimento do processo de simulação de um circuito eletrônico utilizaremos um exemplo simples: uma fonte retificadora de meia onda. Foi acrescido neste circuito um indutor com o único objetivo de adicionar algum tipo de interferência.

2.4.1. DESENVOLVENDO UM ESQUEMÁTICO NO SOFTWARE PROTEUS - MÓDULO ISIS

No módulo Isis inserimos os componentes, e depois são efetuadas as conexões conforme esquemático da fonte. Note na Figura 2.1 que no lugar do transformador foi colocado um borne. Desta forma, posteriormente teremos os pontos para solda direta na placa de circuito impresso.

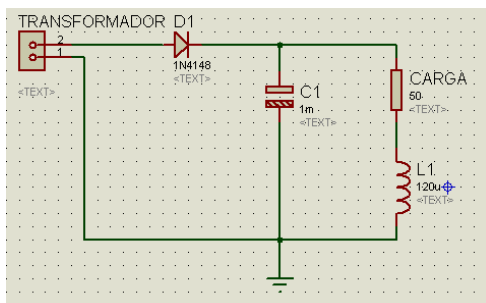


Figura 2.1 - Esquemático de uma fonte retificadora de meia onda

2.4.2. DESENVOLVENDO UM LEIAUTE NO SOFTWARE PROTEUS - MÓDULO ARES

O arquivo gerado anteriormente no módulo Isis é transferido para o módulo Ares. Neste módulo é realizada a inserção automática dos componentes, deixando a caráter do software a escolha de posicionamento dos componentes. Posteriormente o roteamento pode ser feito de forma automática ou manual. Neste caso optamos pelo roteamento automático de trilhas, resultando no leiaute abaixo, Figura 2.2. A espessura das trilhas foi pré-definida antes de iniciar o processo de leiaute, seguindo valores empíricos de 1mm para cada 1A que circula no circuito.

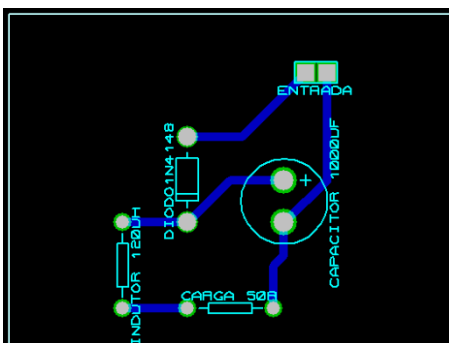


Figura 2.2 - Leiaute fonte retificadora de meia onda

2.4.3. INSERINDO LEIAUTE NO SI WAVE

Para inserir um leiaute no SI Wave é necessário gerar um arquivo Gerber no Proteus. Gerber é um tipo de arquivo padrão utilizado em softwares de desenvolvimento de leiaute para placas de circuito impresso. Neste arquivo estão contidas informações como furação, planos de terra e de Vcc, profundidade de penetração da ferramenta durante o processo de fresagem, formato das trilhas e ilhas bem como sua espessura.

Após a geração deste arquivo é necessário converter este arquivo para uma outra extensão compatível com os softwares da Ansoft®. Em se-

guida são inseridos os componentes e definidas as trilhas de Vcc e GND. O resultado final é visto na Figura 2.3.

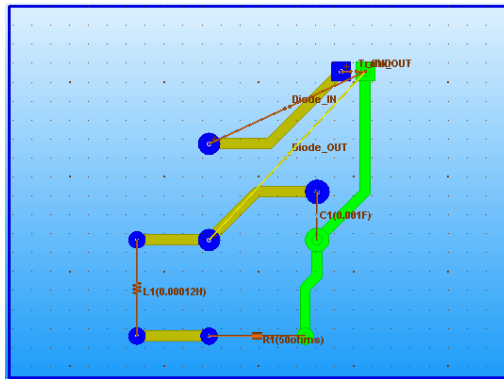


Figura 2.3 - Leiaute fonte retificadora meia onda inserido no SI Wave

2.4.4. INSERINDO MODELO SI WAVE NO DESIGNER

Após a simulação realizada no SI Wave uma cópia do arquivo é gerada. A partir dele temos um modelo numérico que pode ser inserido no Designer. Na Figura 2.4 podemos observar como adicionar um modelo numérico gerado pelo SI-Wave no Designer.

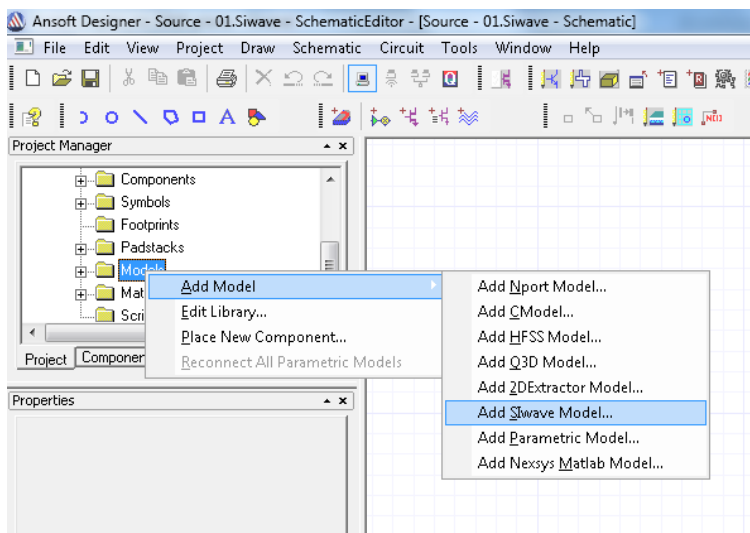


Figura 2.4 - Inserindo modelo do SI Wave no Designer

Na Figura 2.5, podemos observar o bloco central com os pinos de GND, Trafo_out, Diodo_in e Diodo_out, que é o modelo gerado no SI_Wave.

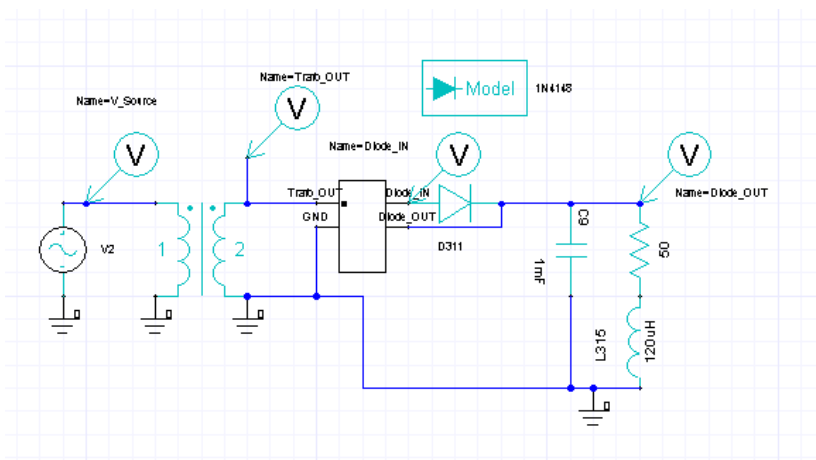


Figura 2.5- Fonte modelada no Designer

Também é possível visualizar o diodo e o modelo do diodo no canto superior direito. Dentro deste modelo foram inseridas todas as características fornecidas pelo fabricante do diodo.

2.4.5. REALIZANDO SIMULAÇÃO ELETRÔNICA NO DESIGNER

Para visualizar os resultados da simulação numérica realizada no Designer, basta inserir as ponteiros (de tensão, corrente ou de potência) nos pontos de interesse. Pode-se observar nas Figuras 2.6 e 2.7 os sinais capturados na simulação. É importante notar que para este caso trata-se de ponteiros de tensão.

Nas Figuras 2.6 e 2.7 é possível verificar que o comportamento do sinal é verdadeiro, isto é, são sinais que por serem vistos de forma frequente podemos verificar que estão corretos.

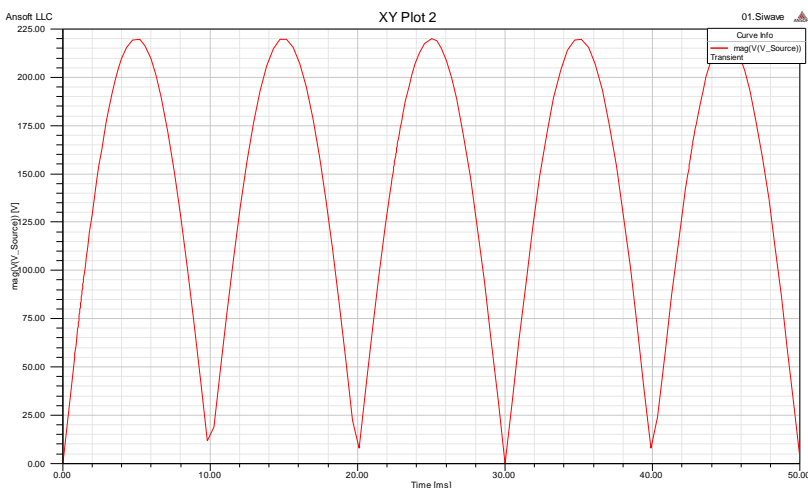


Figura 2.6 - Sinal de entrada do transformador

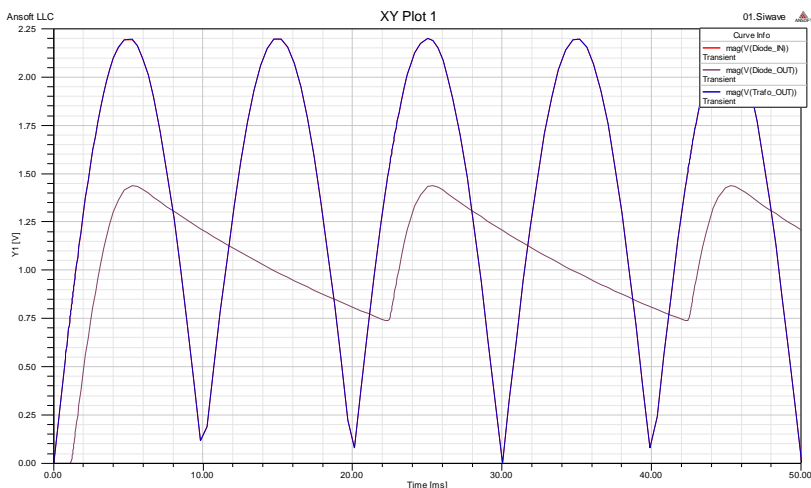


Figura 2.7- Tensão de entrada e saída do diodo retificador

Um dos pontos fundamentais deste estudo refere-se as não idealidades dos componentes eletrônicos. Como mencionado anteriormente, os componentes eletrônicos em sua forma ideal possuem apenas resistência, indutância ou capacitância de acordo com o componente e valor idêntico ao apresentado no encapsulamento do mesmo. No entanto os componentes fabricados em grande escala tem normalmente entre 5% de tolerância.

Além disso, é importante ressaltar que os valores expressos no encapsulamento dos componentes são definidos quando um sinal na frequência de 1kHz e 1Vpp circula pelo mesmo.

2.4.6. EXTRAINDO PARÂMETROS DE EXCITAÇÃO

Os parâmetros de excitação são gerados após a simulação. Essa etapa é necessária para que as características elétricas de simulação do circuito sejam consideradas no processo de cálculo de campos. Para tal é preciso definir-se o tempo em que o mesmo inicia e o tempo final, o número de harmônicas e o tipo de janela desejada. Na Figura 2.8 é mostrada a janela onde são realizadas as configurações para extração de excitação.

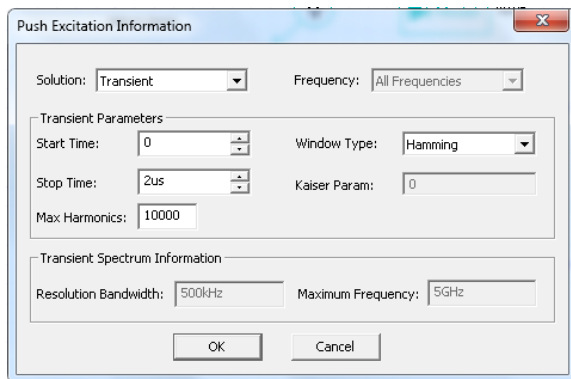


Figura 2.8 - Configurações para extrair parâmetros de excitação

2.4.7. CALCULANDO CAMPO DISTANTE

O cálculo de campo distante é realizado utilizando-se em conjunto os softwares Designer e SI Wave. Cada software contribui com parcelas de cálculo numérico que realizam análises diferentes para obtenção e um resultado mais fiel. Para realizar o cálculo de campo distante é necessário realizar o cálculo de parâmetros S e dos parâmetros de excitação. Estes parâmetros agregam mais veracidade na simulação, ou seja, somam características não ideais a simulação. Só então, de posse destes resultados, é possível realizar o cálculo de campos.

O campo distante é calculado a partir de 1 metro de distância. Este limite não é fixo no espaço, uma vez que ele depende da frequência de operação dos sinais envolvidos e também do montante de erro que pode ser tolerado para cada aplicação [7].

Na Figura 2.9 vemos a janela onde são inseridos os valores de frequência inicial e final, o número de pontos (que define maior ou menor precisão no gráfico solicitado) que desejamos e a forma de distribuição destes. Neste caso, a frequência de interesse é de 0MHz a 5GHz e o número de pontos solicitados foi de 601. Este número de pontos foi escolhido arbitrariamente apenas com intuito de verificar a resposta do software.

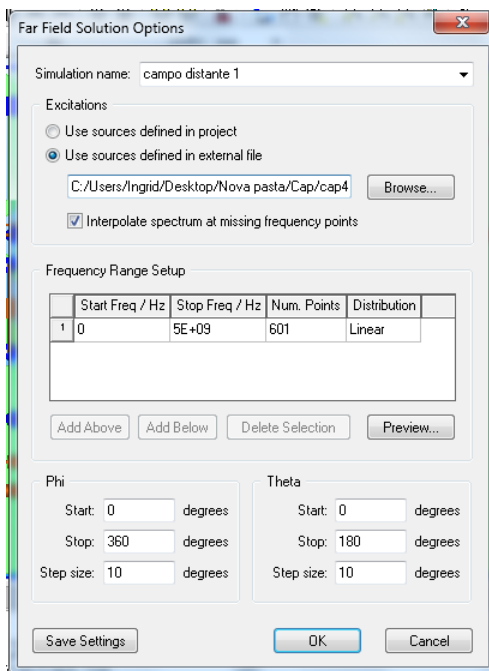


Figura 2.9 - Parâmetros para cálculo de campo distante

2.4.8. RESULTADO DE CAMPO DISTANTE

O tempo de processamento para realizar o cálculo numérico de campos eletromagnéticos pode levar algum tempo, dependendo do tamanho da placa de circuito impresso a ser analisada e do número de pontos solicitado. Neste caso o tempo foi de aproximadamente uma hora. Na Figura 2.10 podemos observar o resultado.

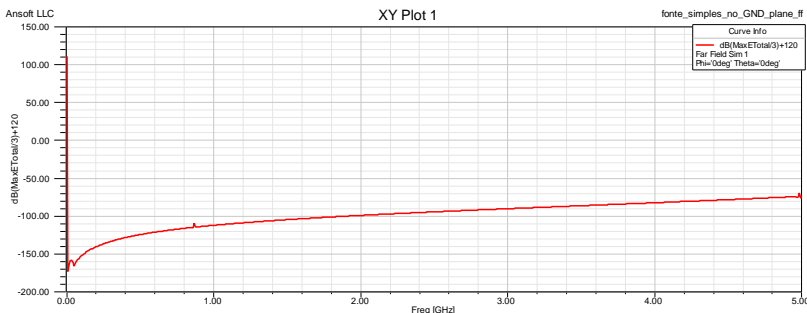


Figura 2.10- Campo distante a 3 metros fonte retificador meia onda

O resultado exibido na Figura acima é coerente, pois numa fonte retificadora de meia onda não há motivos que justificam a existência de uma emissão de ruídos radiados significativos. Ou seja, além de operar numa frequência baixa (60Hz) não existem componentes de chaveamento (transistores). O único pico de radiação é justamente na frequência de operação da rede de energia elétrica em 60Hz.

2.5. CONCLUSÃO

Neste capítulo demonstrou-se o uso de softwares para simulação eletrônica de circuitos, desenvolvimento de leiaute e para simulação numérica de circuitos eletrônicos.

Os *softwares* da Ansoft® são ferramentas poderosas tanto para simulação eletrônica quanto para de campos eletromagnéticos. No entanto o *software* requer bastante estudo e dedicação para utilização de forma correta. A interface não tão amigável, num primeiro momento impediu a exploração de todas as ferramentas. Também possui algumas limitações no que se refere à importação e exportação de arquivos dificultando assim a execução do trabalho.

Estes softwares permitem modelar um circuito com características próximas do funcionamento real. No próximo capítulo o circuito de aplicação será apresentado, bem como seu protótipo e as simulações realizadas referentes a ele.

3. CIRCUITO DE APLICAÇÃO

Como mencionado anteriormente no capítulo 1, as fontes chaveadas são amplamente utilizadas em grande parte dos equipamentos eletrônicos. Devido ao uso em grande escala percebeu-se que podem causar interferência eletromagnética no equipamento em que estão inseridas ou até mesmo em outros no mesmo ambiente. Desta forma uma atenção maior começou a ser despendida no estudo de técnicas de redução de ruídos eletromagnéticos oriundos da mesma, por sua relação frequente com problemas de compatibilidade eletromagnética.

Por esta razão o equipamento a ser analisado no presente trabalho trata-se de uma fonte chaveada. Neste capítulo será apresentado de forma breve o modelo de fonte chaveada escolhido, como foram realizadas as medidas e as simulações para alcançar os resultados desejados.

3.1. FONTE CHAVEADA TIPO BUCK

Uma forma simples de reduzir uma tensão é através do uso de um divisor resistivo. Entretanto, quando comparados com os conversores chaveados, dissipam muito calor na conversão (perda de energia) e consequentemente uma baixa eficiência (um conversor *buck* bem projetado pode ter mais de 95% de eficiência). O protótipo objeto deste estudo trata-se de um conversor estático abaixador CC-CC do tipo Buck. O esquema do circuito *buck* em sua configuração básica é apresentado na Figura 3.1.

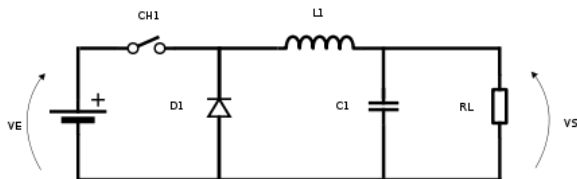
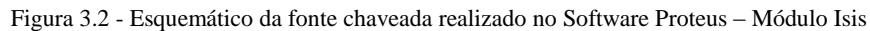


Figura 3.1 - Conversor Buck

Conversores Buck são utilizados para reduzir a tensão das baterias de laptops, (12-24V) fornecendo os poucos volts necessários ao funcionamento dos processadores. Os conversores *buck* e *boost*, em todas as suas combinações, isoladas ou não, formam o princípio de funcionamento de outros conversores chaveados existentes (*buck-boost*, *fly-back*, *forward*, etc).

Na Figura 3.2 é exibido o esquema elétrico da fonte chaveada escolhida para realizar a construção do protótipo, o modelo desta fonte é visualizado no software Proteus módulo Isis.



Na Figura 3.3 é apresentado o leiaute desenvolvido no *software* Proteus módulo Ares. Para desenvolver este leiaute tanto a distribuição dos componentes quanto a forma de roteamento escolhida foi manual. Deste modo, os componentes que dissipam maior calor foram posicionados nas bordas da placa (assim dissipam melhor o calor sem a necessidade de dissipadores de calor) e o roteamento foi realizado de modo a gerar planos de terra maiores para facilitar a produção do protótipo.

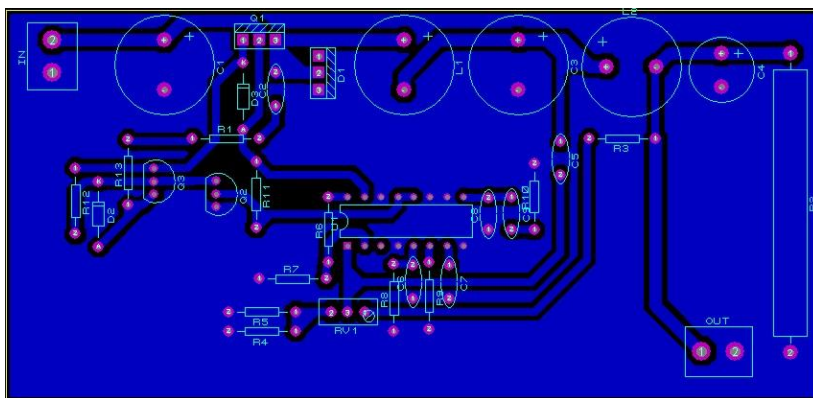


Figura 3.3 -Leiaute da fonte chaveada realizado no Software Proteus – Módulo Ares

Após a realização do leiaute houve o processo manual de corrosão da placa de circuito impresso. A furação e soldagem dos componentes também foram realizadas manualmente. Este software ainda possibilita a visualização da placa em três dimensões, permitindo verificar a distribuição dos componentes. Na sequência, as Figuras 3.4 e 3.5 exibem o leiaute em três dimensões e o resultado final de construção do protótipo, respectivamente.

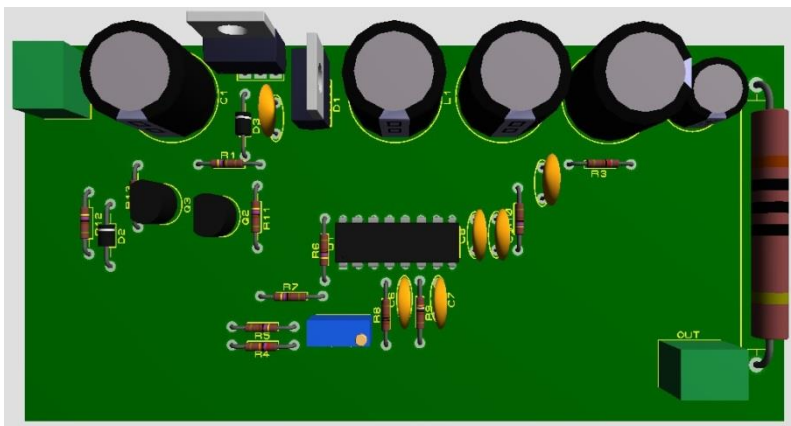


Figura 3.4 - Leiaute desenvolvido no Software Proteus módulo Ares - Visualização em três dimensões.



Figura 3.5 - Protótipo fonte chaveada

Como foi possível observar, a funcionalidade de exibição em três dimensões, nos dá uma ideia muito próxima de como ficará a placa de circuito impresso depois de concluída. Ainda podemos observar que no protótipo alguns componentes, os indutores em específico, tem o encapsulamento que difere do encapsulamento inserido para desenvolvimento do leiaute. Isto

ocorre porque os indutores necessários não foram encontrados comercialmente, logo houve a necessidade de produzi-los de forma artesanal.

3.2. MEDIDAS

3.2.1. MEDIDAS REALIZADAS COM OSCILOSCOPIO

As medidas com osciloscópio foram realizadas com o intuito de verificar as formas de onda da fonte chaveada. Foram utilizados o osciloscópio virtual do software Designer e o Osciloscópio Digital Minipa, MO-2250 DC, 250MHz.

Na sequência de Figuras abaixo podemos observar os principais pontos de medidas, Figura 3.6 - onda dente de serra (pino7), Figura 3.7 - sinal de PWM (pino 12/13) e Figura 3.8 - sinal de saída da fonte.

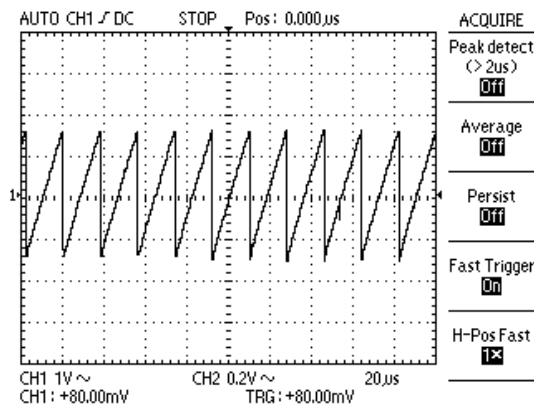


Figura 3-6 - Sinal do pino 7 do CI SG 3524 - Onda dente de serra

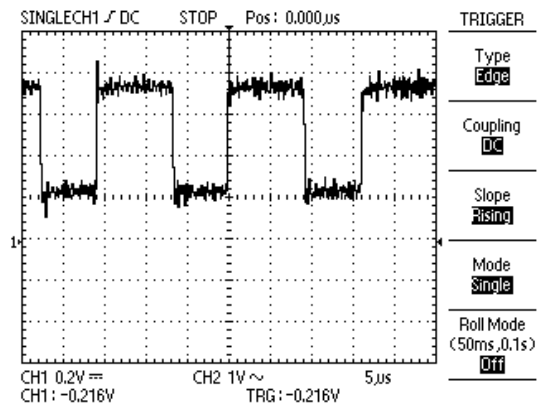


Figura 3-7 - Sinal do pino 12/13 - Sinal PWM do CI SG3524

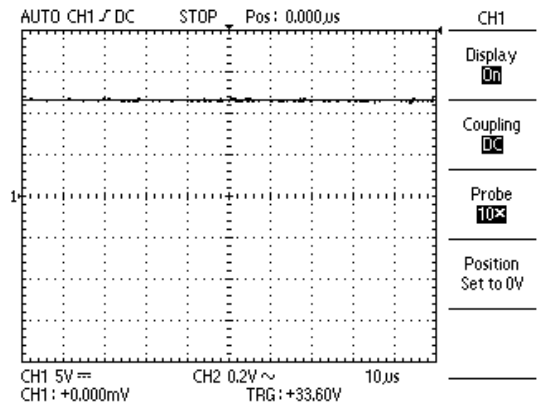


Figura 3-8 - Sinal de saída da fonte chaveada

É possível visualizar que as formas de onda têm o comportamento esperado para cada uma delas de acordo com modelos estudados.

3.2.2. MEDIDAS REALIZADAS NA GTEM

Para realizar as medidas da fonte chaveada na câmara GTEM a fonte chaveada sobre teste (EUT) e a bateria de alimentação foram adequadamente posicionados na câmara GTEM, próximo aos absorvedores, de forma a centralizá-lo entre a placa condutora e o chão da câmara. Sendo assim, tem-se que: $d = 50$ cm, conforme Figura 3.9.

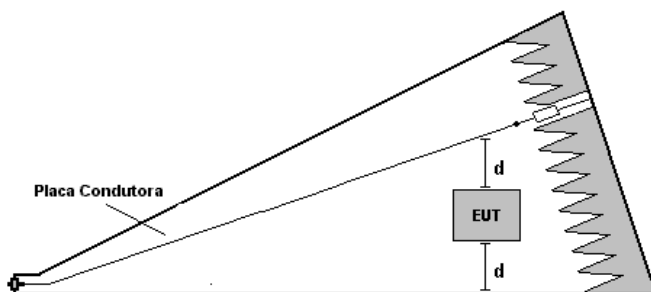


Figura 3-9 - Localização da fonte chaveada (EUT) na câmara GTEM

Após a colocação adequada da fonte chaveada e todos os equipamentos serem ligados, o Software EMC32 é inicializado. As características do ensaio são configuradas via software de acordo com a norma utilizada para cada equipamento. Neste caso, a norma CISPR 22, equipamentos classe B, com faixa de radiação de 30MHz a 1GHz.

As medidas de campo elétrico distante foram realizadas utilizando a GTEM, com resultados para 3 metros de distância observadas na Figura 3.10. Estas foram efetuadas conforme as normas da CISPR. Condições climáticas no momento em que as medidas foram realizadas: umidade 65% e temperatura 22° C.

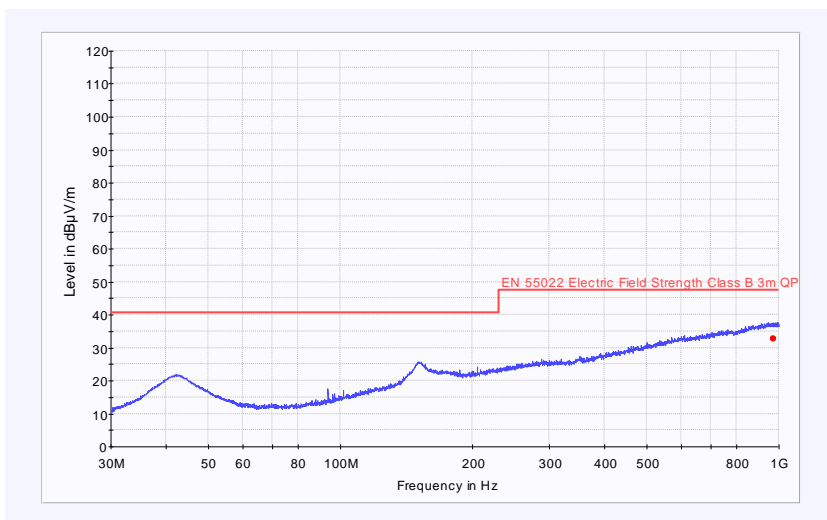


Figura 3-10 - Medida de campo distante a 3m realizada na GTEM da fonte chaveada tipo Buck

3.2.3. MODELAGEM DOS COMPONENTES ELETRÔNICOS

Os componentes eletrônicos são projetados para terem valores específicos. No entanto a maioria dos componentes apresenta tolerância de $\pm 5\%$. Além disso, ainda existem as parcelas indesejáveis que aparecem em um componente. Um resistor de 1000Ω com tolerância de $\pm 5\%$ por exemplo, pode ter um valor que varia de 950Ω até 1050Ω . E dependendo da frequência em que este está operando, pode possuir uma parcela indutiva e capacitiva que interfira no seu modo de funcionamento, conforme colocado no capítulo 1.

A primeira simulação realizada onde todos os componentes eram considerados ideais, tiveram como resultado a geração de campo que tendiam ao infinito, isto é, resultados que não eram coerentes. Para que os resultados sejam coerentes, todos os componentes passivos foram submetidos a uma medição numa ponte RLC. Este equipamento permite inserir a frequência na qual o componente irá operar, e obter como resposta os reais valores de resistência, capacitância e indutância para cada componente. Por exemplo, ao

inserir um indutor teremos como resposta o valor de indutância em 60 kHz, frequência de operação da fonte chaveada, e também o valor de resistência e de capacitância parasita.

A frequência utilizada para realizar as medidas dos componentes foi de 60 kHz, por ser a frequência de chaveamento da fonte, na ponte RLC, modelo 4248A da marca Hewlett Packard.

Podemos notar na Tabela 1 que não só o resistor tem variações no valor de resistência, que normalmente ultrapassam o percentual indicado pelo fabricante, como também possuem parcelas indutivas e capacitivas.

Para obtermos um resultado com maior veracidade foi necessário obter um modelo para o circuito integrado, que como mencionado anteriormente, possui vários componentes internos que podem causar alguma interferência durante sua operação. Para tanto, a primeira escolha foi à busca entre os fabricantes do mesmo, por um modelo IBIS ou semelhante. No entanto, devido ao tempo em que o CI SG 3524 está no mercado, e ser considerado por alguns como obsoleto, esta tentativa não obteve sucesso.

Sendo assim, outra tentativa realizada foi adaptar um modelo de outro circuito integrado ao desejado. Os resultados alcançados foram incoerentes, não correspondendo em nada aos resultados do componente.

Como terceira tentativa tentou-se utilizar o modelo gerado pelo software SI Wave, e mais uma vez os resultados obtidos foram equivocados.

Assim como última alternativa, optou-se por adaptar o modelo gerado pelo SI Wave. A partir deste modelo foram inseridos os sinais captados em cada pino do circuito integrado com o auxílio do osciloscópio digital.

Apesar de não conter tanta riqueza de detalhes, como um modelo IBIS ou semelhante, disponibilizariam. Os resultados alcançados foram muito bons e podem ser vistos no capítulo seguinte.

Componente	Valor nominal	Indutância (H)	Capacitância (F)	Resistência (Ω)
Indutor	1.6mH	1.48m	4.36p	0.630
	1mH	0.93m	2.49p	0.338
Capacitor	2200uF	18n	2130u	0.25
	2200uF	17.5n	2170u	0.23
	470uF	7n	465u	0.08
	10nF	0.01n	9.6n	0.001
	4.7nF	0.01n	4.8n	0.001
	1nF	0.01n	1.07n	0.001
	47nF	0.01n	45n	0.001
	0.22uF	0.01n	0.20u	0.001
	2.2nF	0.01n	2.1n	0.001
Resistor	47k Ω	--	--	46k
	47k Ω	--	--	46.5k
	47k Ω	--	--	46.6k
	47k Ω	--	--	46k
	47k Ω	--	--	47.2k
	47k Ω	--	--	47k
	47k Ω	--	--	46.9k
	10k Ω	--	--	9.95k
	10k Ω	--	--	10.1k
	270k Ω	--	--	272k
	120 Ω	--	--	118
	1k Ω	--	--	1.05k
	47 Ω	--	--	46
	47 Ω	--	--	47
	8.2k Ω	--	--	8.3k
	100 Ω	0.0007n	0.0000001u	108

Legenda: k = 10³ m = 10⁻³ u = 10⁻⁶ n = 10⁻⁹ p = 10⁻¹²

Tabela 1 – Tabela de valores de encapsulamento dos componentes e suas parcelas indutivas, resistivas e capacitivas medidas na frequência de 60 kHz efetivadas na ponte RLC 4248A da marca Hewlett Packard.

3.3. SIMULAÇÕES

Para realizar as simulações de campo distante foram utilizados os softwares SI Wave e Designer. Eles realizam a simulação valendo-se de métodos de cálculo numérico para obter uma resposta. Anteriormente, no capítulo 2, foram exibidos os passos necessários para obter como resultado o gráfico de campos eletromagnéticos distantes. Neste capítulo teremos uma fonte chaveada como objeto de estudo. Podemos observar na Figura 3.11 o leiaute desenvolvido no *software* Proteus Módulo Ares inserido no SI Wave já com todos os componentes passivos inseridos. Ao adicionar cada componente foram inseridos seus valores nominais de encapsulamento e também foram adicionadas suas não idealidades mostradas na tabela 1.

Após a inserção de todos os dados pertinentes foram realizadas as simulações no *software* SI Wave. Todos os parâmetros foram ajustados conforme as normas CISPR.

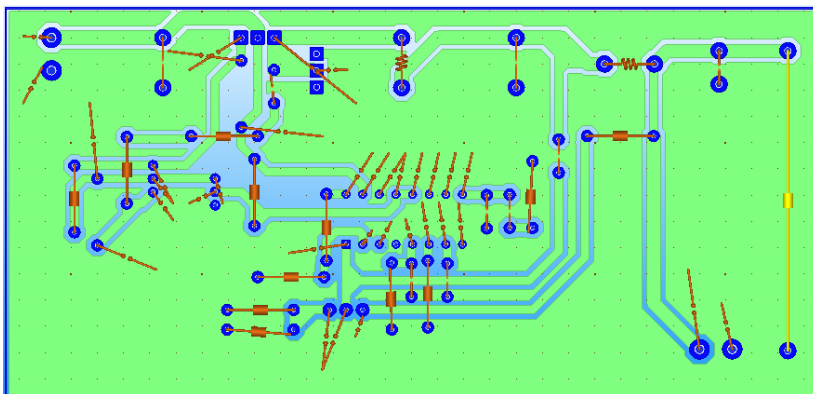


Figura 3.11 -Fonte chaveada modelada no SI Wave

O próximo passo foi realizar a transferência do modelo exibido acima para o Designer. Após a inserção do modelo do SI Wave no Designer são inseridos os componentes ativos no circuito. O modelo gerado pelo SI Wave inserido no Designer pode ser observado na Figura 3.12.

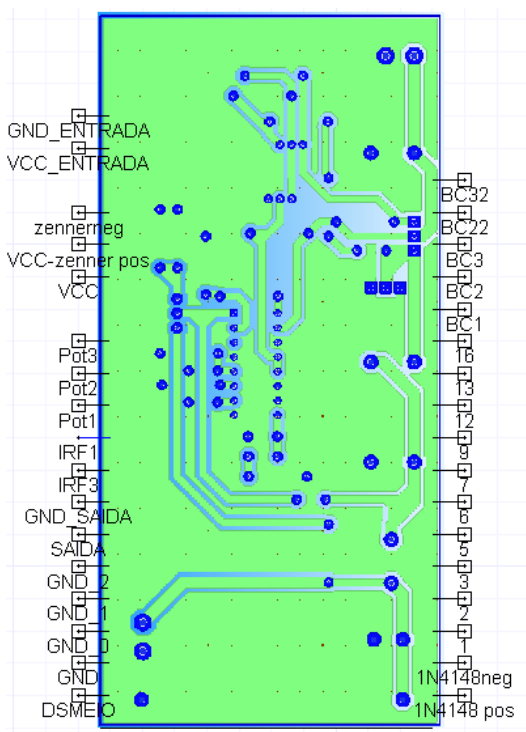


Figura 3-12- Modelo gerado pelo SI Wave inserido no Designer

Inicialmente acreditava-se que apenas com o modelo gerado pelo SI Wave teríamos bons resultados. No entanto eles mostraram-se irrisórios. Ao se desconsiderar o sinal gerado pelo PWM do circuito integrado, também se desconsiderava o chaveamento dos transistores, chaveamento este que é uma das origens da interferência eletromagnética.

O software permite a inserção de modelos IBIS, que como mencionado anteriormente, permite a adição de outras características como, por exem-

plo, tempo de subida, tempo de descida e em alguns até o chaveamento interno de transistores. No entanto, o circuito integrado em questão, o SG 3524, trata-se de um modelo muito antigo, e por isso não apresenta um modelo IBIS associado.

Houve a tentativa de criação de um modelo IBIS adaptado para SG 3524. Partiu-se de um modelo IBIS de um circuito integrado com o mesmo número de terminais e algumas semelhanças no que diz respeito à funcionalidade. Então, a partir da folha de dados fornecida pelo fabricante algumas informações foram inseridas. Apesar dos esforços despendidos, cada circuito integrado tem suas singularidades, e a tentativa não resultou em sucesso (embora o fabricante forneça várias informações na folha de dados, elas não foram suficientes para criar um modelo IBIS satisfatório).

Como comentado antes, devido ao fato de não existir um modelo IBIS ou semelhante do CI SG 3524 foi necessário realizar uma adaptação entre o modelo gerado pelo SI Wave e os sinais medidos em cada pino do CI no protótipo construído.

Deste modo para simular de uma forma mais realista o circuito integrado, no modelo gerado no SI Wave foi necessária a inserção de uma fonte de sinal em cada pino do SG 3524. A fonte de sinal permite a inserção de qualquer tipo de sinal digital, para que sejam replicadas durante a simulação do circuito. Neste caso foi adicionado ao arquivo de cada fonte o sinal capturado com o osciloscópio digital. Por exemplo, no pino 7 foi inserido o sinal capturado da onda dente de serra. Assim foi realizada a captura em todos os pinos e inseridos nas suas respectivas fontes de sinal, com o intuito de obter maior veracidade no resultado final.

Na Figura 3.13 temos o modelo do SI Wave inserido no Designer, já com os diodos e transistores, bem como as fontes de sinal e tensão. É importante observar que apesar do símbolo para o modelo do diodo zener e do diodo 1N4148 serem iguais, as características inseridas em cada modelo foram extraídas da folha de dados fornecida pelos respectivos fabricantes.

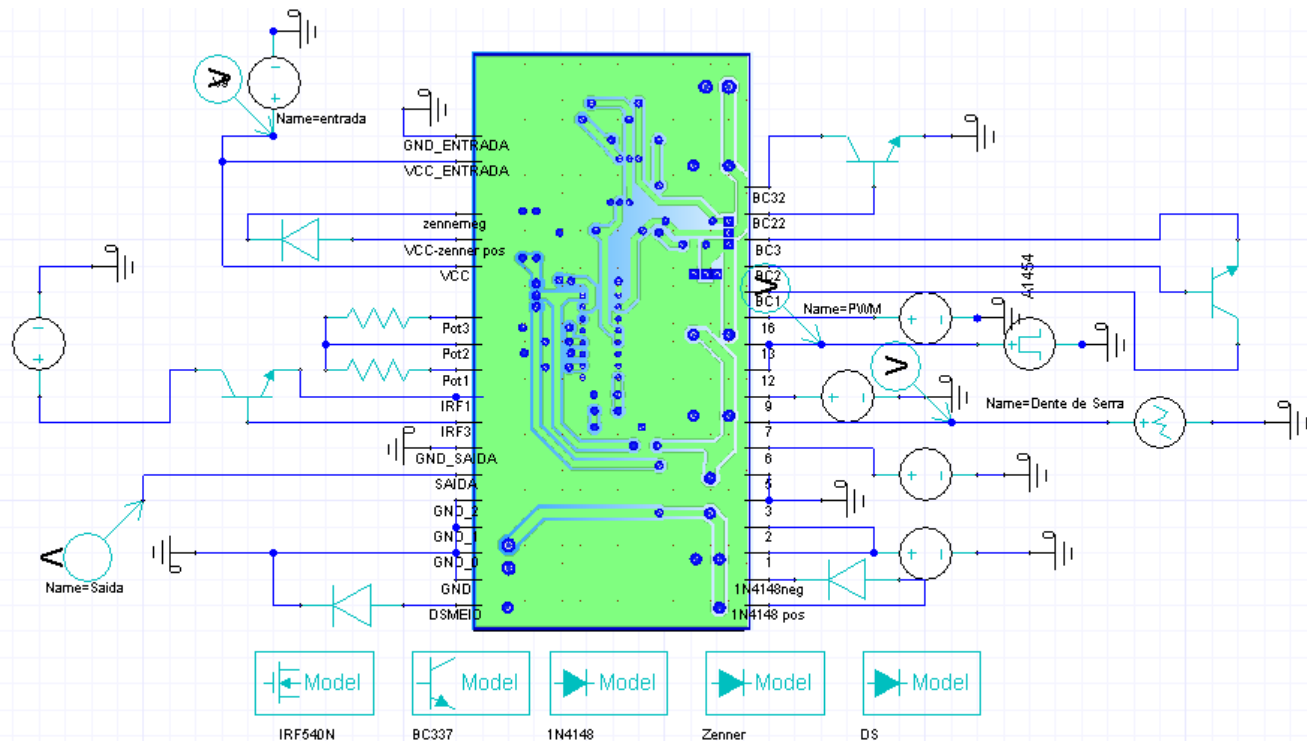


Figura 3.13 - Fonte modelada no Designer

A simulação no software Designer resulta em arquivos que contém informações elétricas que auxiliam no cálculo de campos eletromagnéticos. De posse destas informações, basta solicitar ao software o cálculo e exibição do gráfico de campo distante. Para isso o número de pontos e a faixa de frequência da simulação são equivalentes às definidas anteriormente durante a realização das medidas na GTEM. O tempo total de simulação foi de 13 horas. Na Figura 3.14 podemos observar o resultado do cálculo de campos eletromagnéticos distante a 3m.

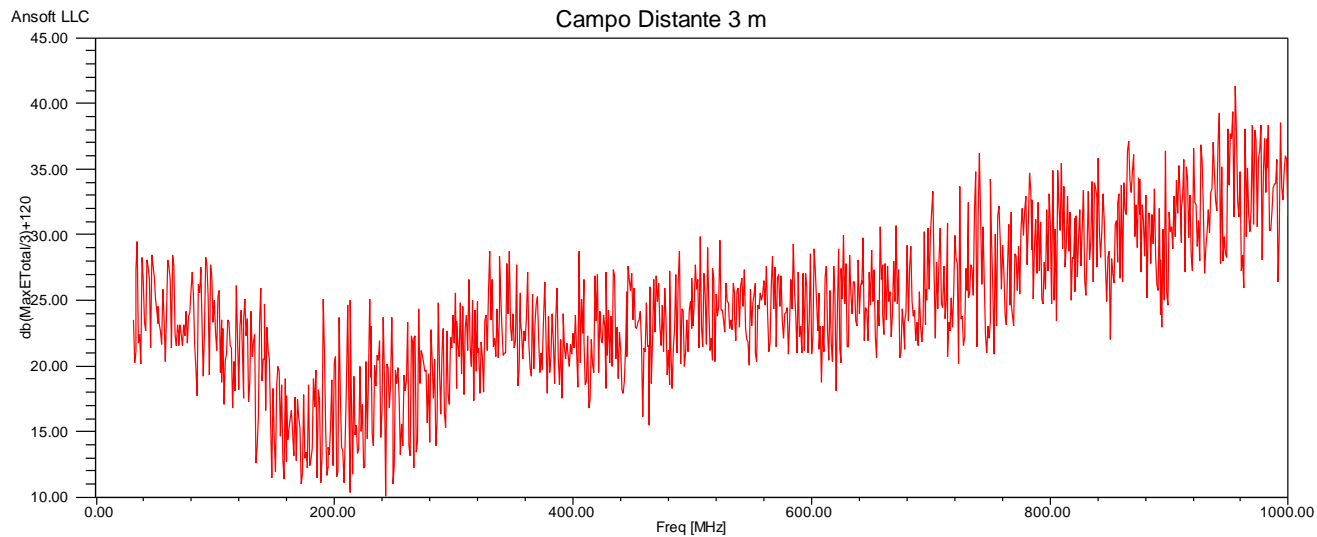


Figura 3.14 - Campo distante a 3m simulado no software SI-Wave

Observando a Figura 3.14 num primeiro momento é possível pensar que o resultado pode estar incorreto. No entanto, ao observar mais atentamente, são perceptíveis os picos nas mesmas frequência observadas no resultado das medidas realizadas na GTEM. Outro ponto importante a se observar é o fato de estamos numa escala linear, diferentemente do resultado da GTEM onde temos uma escala de base logarítmica.

Ainda referente a simulação de circuitos, mas agora tratando de sinais eletrônicos medidos, podemos observar e até mesmo comparar com os resultados obtidos previamente nas medidas realizadas no osciloscópio. Na sequência temos as Figuras 3.15 a onda dente de serra gerada pelo CI SG 3524, Figura 3.16 o sinal PWM gerado pelo CI SG 3524 e por fim Figura 3.17, com o sinal de saída da fonte.

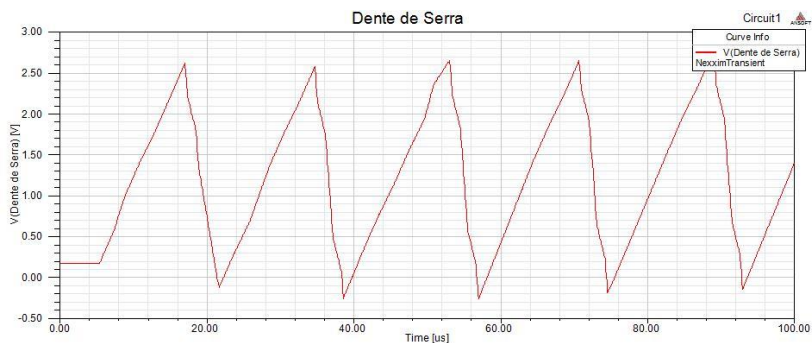


Figura 3-15 – Pino 7- onda dente de serra simulado

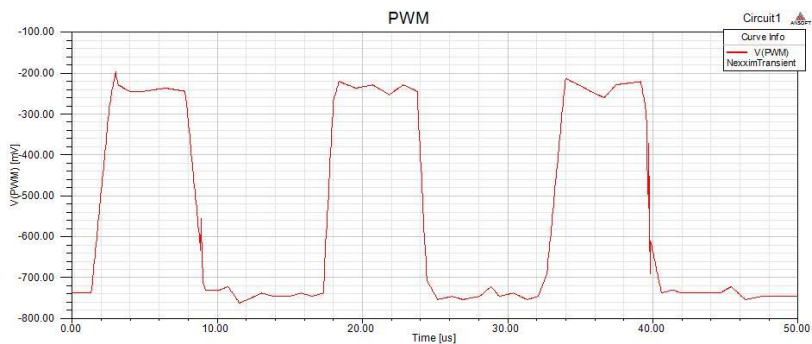


Figura 3-16- Pino 12/12 - Sinal PWM simulado

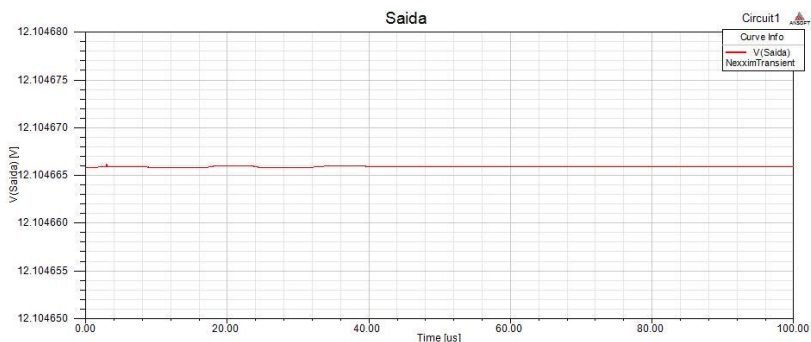


Figura 3.17- Sinal de saída da fonte de alimentação simulado

Algumas diferenças nas formas de onda foram observadas nas Figuras extraídas do software Designer. Estas diferenças ocorrem porque o circuito integrado SG 3524 não possui modelo IBIS, portanto ele não pode ser simulado no software. Deste modo foi necessário criar um modelo novo especialmente para este circuito. Como comentado anteriormente, fontes de sinal foram inseridas com sinais capturados do osciloscópio.

3.4. CONCLUSÃO

Neste capítulo percebeu-se que por mais assertivo que o projetista deseje ser, este é passível de “erros” em seu projeto em virtude da variação na precisão de cada componente.

Um grande problema enfrentado foi a aquisição de dados dos componentes considerando não idealidades. Para isto, foram realizadas medidas utilizando uma ponte RLC modelo 4248A da marca Hewlett Packard. Para cada resistor, capacitor e indutor, foi realizada uma medida na frequência de 60kHz onde foram anotadas as resistências, capacitâncias e indutâncias parasitas.

O circuito integrado utilizado para geração do PWM também acabou por ser um obstáculo. Trata-se de um circuito integrado muito utilizado em varias aplicações, mas que não dispõe de modelo IBIS. Algumas medidas de aquisição de dados do circuito foram feitas e resultaram numa tentativa falha de criar um modelo semelhante ao IBIS que fornecesse alguns dados necessários para uma simulação com melhores resultados.

Caso seja realizada uma simulação onde nenhuma não idealidade seja considerada, os resultados obtidos pelo *software* no que se refere a campo distante são insignificantes.

4. RESULTADOS

O intuito deste estudo era verificar se com o auxílio da simulação eletrônica seria possível a obtenção de resultados significativos quando comparados às medidas realizadas em câmaras GTEM.

No capítulo 3 foram exibidos os resultados de campo eletromagnético distante a 3m medidos na célula GTEM e simulados nos *softwares* da Ansoft®. Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos da comparação entre eles. Deste modo serão exibidos no mesmo gráfico as duas análises de forma a comparar os dados medidos com os dados simulados.

4.1. RESULTADOS DE CAMPO ELÉTRICO DISTANTE

Previamente no capítulo 3 foram exibidos os resultados de campo distante medido na GTEM e simulado nos softwares da Ansoft®. De modo a ilustrar de forma mais clara, são expostos no mesmo gráfico os dados obtidos em ambos os procedimentos.

Na Figura 4.1 podemos observar as curvas geradas por cada procedimento, o que nos permite analisar a validade da utilização destes softwares como forma previa de análise de campos distantes.

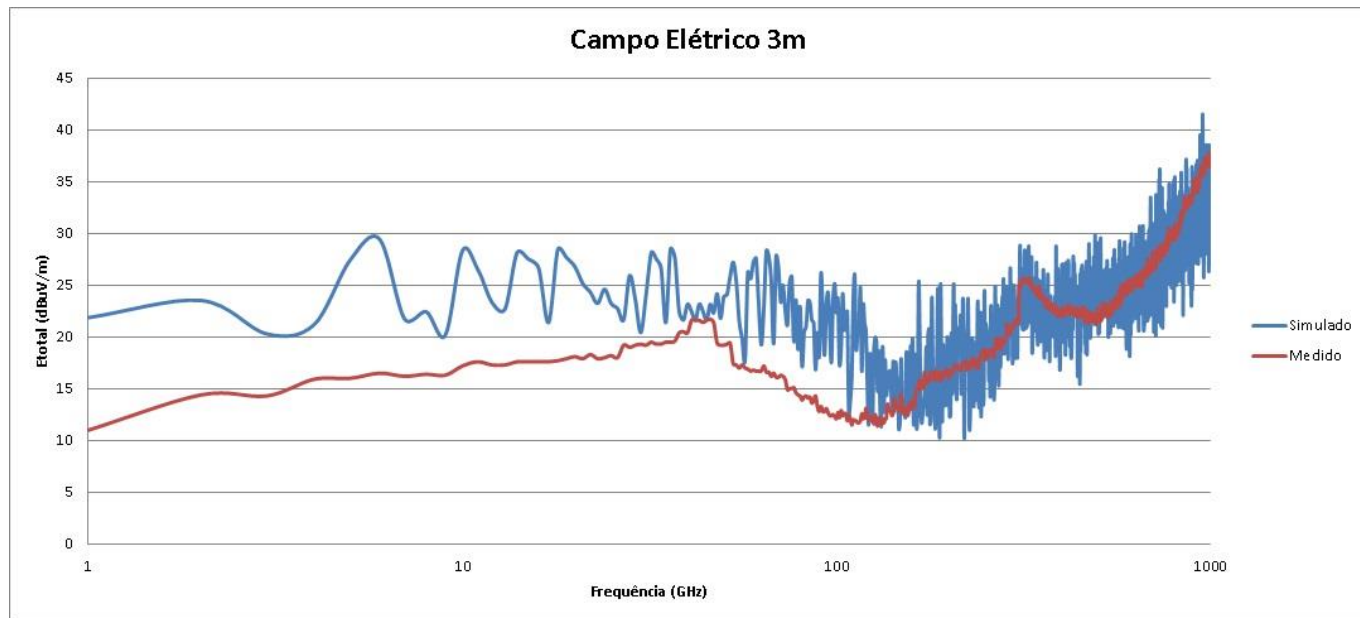


Figura 4.1 - Comparação campo distante 3m medido e simulado.

Referente à Figura 4.1 podemos observar que existem algumas discrepâncias entre os valores simulados e medidos, principalmente nas frequências mais baixas.

Isto acontece devido há uma soma de fatores, entre eles:

- o espalhamento não uniforme da camada de cobre depositada sobre o fenolite. Essa desigualdade pode gerar resistências que não foram previstas;
- o circuito integrado não possuir o modelo IBIS, além de não considerar a impedância do CI, também não simula suas condições internas;
- a desconsideração da parcela conduzida;
- o software SI Wave não considera a radiação dos circuitos integrados, apenas a radiação das trilhas da PCI. Já nas medidas realizadas na câmara GTEM, toda a radiação do circuito é ponderada.
- os componentes não serem de alta precisão e variarem de acordo com a frequência de operação;
- variações climáticas (umidade e temperatura), etc.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estudo da compatibilidade eletromagnética torna-se cada vez mais importante, uma vez em que os equipamentos eletrônicos estão todos os tipos de ambiente. Essa presença vem causando o maior número de incidentes no que tange a EMC.

Para prevenir e/ou solucionar estes problemas é preciso ter domínio de conhecimentos específicos desta área, além de contar com o auxílio de equipamentos, instrumentos e ferramentas de simulação numéricas voltados para a análise de compatibilidade.

No presente trabalho a emissão eletromagnética de uma fonte chaveada foi analisada. Esta foi escolhida devido a sua presença em grande parte dos equipamentos e sistemas que estão presentes em quase todos os ambientes, sejam eles industriais, comerciais, ou residenciais.

O intuito desta pesquisa não era de mais uma vez prevenir ou solucionar os problemas de um determinado equipamento. Mas sim utilizar-se de uma ferramenta de simulação numérica que pretende fornecer resultados semelhantes aos de uma medida realizada numa câmara GTEM.

Apesar de trabalhar com um projeto muito semelhante ao de um modelo comercial, foram utilizados recursos de simulação eletrônica e de montagem em matriz de contatos para testes prévios. Desta forma, optou-se pela utilização do *software* Proteus devido ao fato de ter uma licença gratuita e permitir não só a realização da simulação, bem como o desenvolvimento do leiaute do circuito.

Várias etapas foram realizadas para alcançar o resultado final deste estudo. Entre elas a construção do protótipo, a modelagem e as simulações numéricas, utilizando os softwares Designer e SI Wave.

O circuito em estudo tem um nível de complexidade médio, possuindo diversas vias e dezenas de componentes. Por esta razão o cálculo numérico no *software* tornou-se mais complexo, ou seja, mais variáveis são consideradas e um maior número de cálculos é realizado. Para isto é necessário um computador com uma boa capacidade de memória e maior velocidade de processamento.

Pequenas diferenças foram constatadas entre resultados simulados e medidos. Estas diferenças podem ser decorrentes de diversos fatores, entre eles:

o espalhamento não uniforme da camada de cobre depositada sobre o fenolite, o circuito integrado não possuir o modelo IBIS, a não consideração da parcela conduzida, os componentes não serem de alta precisão e variarem de acordo com a frequência de operação, variações climáticas(umidade, temperatura), etc. É importante ressaltar que devido a umidade elevada a placa de circuito impresso dos protótipos construídos oxidava com rapidez (criando resistências) devido ao fato de a placa de circuito impresso não contar com nenhum tipo de verniz que protegesse contra intempéries. Ao total foram construídos 27 protótipos, e cada vez que um protótipo ficava pronto, novos testes na GTEM eram realizados.

Mesmo assim, podemos observar que os resultados obtidos na simulação e nas medidas foram muito próximos (média de erro de $\pm 7\%$ ao longo do espectro de frequência medido) e este tipo de ferramenta pode ser considerada muito útil tanto na fase de desenvolvimento, como na fase de retrabalho de alguns projetos.

Recomenda-se ainda, que a partir do momento inicial do projeto seja verificada a existência de modelos IBIS para todos os circuitos integrados que serão utilizados. Desta forma, todos os sinais simulados apresentarão características próximas do funcionamento real. É interessante também que componentes com maior precisão sejam adotados. Deste modo, variações de acordo com a frequência de operação do circuito serão menores.

Tornam-se evidente que estudos relacionados à compatibilidade eletromagnética e circuitos digitais, merecem a atenção de projetistas de circuitos eletrônicos, devido ao crescente uso de equipamentos digitais que geram ou absorvem interferências eletromagnéticas. Além disso, a modelagem numérica tem-se mostrado uma alternativa interessante para a substituição de certas etapas da construção de protótipos, abreviando o trabalho, prevendo, e consequentemente reduzindo os custos do projeto.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] VALENTE JR, W. *Avaliação do ambiente eletromagnético em estabelecimentos assistenciais de saúde*. Florianópolis, 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina.
- [2] PEREZ, R. *Handbook of Electromagnetic Compatibility*. Academic Press, Inc., 1995.
- [3] LIZ, M.B. *Contribuição para a Redução da Interferência Eletromagnética em fontes chaveadas*. Florianópolis, 2008. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina.
- [4] SCHLICHTING, L. C. M. *Contribuição ao Estudo da Compatibilidade Eletromagnética Aplicada aos Conversores Estáticos*. 2003. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- [5] PAUL, C. R. *Introduction to Electromagnetic Compatibility*. New York : Wiley- Interscience, 1992.
- [6] RIES, A.K. *Contribuição ao estudo da interferência eletromagnética em fontes chaveadas para uso comercial*. Florianópolis, 2008. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina.
- [7] CAPPS, C. "Near Field or Far Field?", Design feature, EDN, p. 95-102, ago. 2001.
- [8] CISPR 11, Industrial, Scientific and Medical (ISM) Radio-Frequency Equipment -- Electromagnetic Disturbance Characteristics -- Limits and Methods of Measurement. IEC, Geneva, 2005.

- [9] CISPR 22, Information Technology Equipment -- Radio Disturbance Characteristics -- Limits and Methods of Measurement. IEC, Geneva, 2005.
- [10] POZAR, D. M., *Microwave Engineering, Third Edition* (Intl. Ed.); John Wiley & Sons, Inc. 2005.
- [11] HARRINGTON, R. F. Field Computation by Moment Method, New York Macmillan, 1968.
- [12] IEC 60500, *Eletromagnetic Compatibility - Section 161-01: Basic Concepts*. IEC Central Office, Geneva, Switzerland, 1990.
- [13] PINHEIRO, J.M.S – *Cabeamento Ótico*- Editora Campus – Rio de Janeiro, 2010.
- [14] de LIZ, M. B. *Introdução à Compatibilidade Eletromagnética em Conversores Estáticos*. Florianópolis, 1999. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Instituto de Eletrônica de Potência, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina.
- [15] BOWLES, B. A.; PAUL, C. R. *Modeling Interference Properties of SMPS DC Power Distribution Buses*. In: IEEE NATIONAL SYMPOSIUM ON ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY.
- [16] XIN, T.; THOMAS, D. W. P.; NOTHOFFER, A.; SEWELL, P.; CHRISTOPOULOS, C. "*Modeling Electromagnetic Emissions from Printed Circuit Boards in Closed Environments Using Equivalent Dipoles*", IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, v. 52, p. 462-470, 2010.
- [17] SI Wave – User Guide – ANSOFT® CORPORATION -Pittsburgh, PA – 2009

[18] Designer – User Guide – ANSOFT® CORPORATION -Pittsburgh, PA – 2009

[19] Proteus – User Guide – Labcenter Eletronics –North Yorks, UK – 2007

[20] AYRES, C. A.; SOUZA, L. E. Fontes chaveadas; fundamentos teóricos. FUPAI, Itajubá, 1993.

[21] RASHID, M. H. Eletrônica de Potência; circuitos, dispositivos e aplicações . Makron Books, São Paulo, 1999.

[22] FENG ,B.;ZONG-XIA N.; DONG-FANG Z. *Modeling and Simulation of Radiated Emissions in Switched Mode Power Supply* - Industrial Electronics, IEEE International Symposium v .2 - 2006 , p 903 – 907.

[23] ANTONINI, G.; CRISTINA, S.; ORLANDI, A. *EMC characterization of SMPS devices: circuit and radiated emissions model-* Electromagnetic Compatibility, IEEE Transactions on v. 38 -1996, p 300-309.

[24] CRISTINA, S.;ANTONINI, F.; ORLANDI, A. *Switched mode power supplies EMC analysis: near field modeling and experimental validation.* Electromagnetic Compatibility, 1995. Symposium Record. IEEE International Symposium -1996 , p 453 – 458.

[25] TIHANYI, L. *Electromagnetic Compatibility in Power Electronics.* Oxford: Butterworth-Heinemann, 1995.

[26] REGUE, J. R.; RIBO, M.; GARRELL, J. M.; MARTIN, A. "A Genetic Algorithm Based Method for Source Identification and Far-Field Radiated Emissions Prediction from near-Field Measurements for Pcb Characterization", IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, v.43, p. 520-530, 2001.

- [27] CHOMA, J. , CHEN W.K., “*Feedback networks: theory and circuit applications*”. Singapore: World Scientific. 2007.
- [28] "S-Parameter Design", Application Note AN 154, Agilent Technologies, Inc. 2006.
- [29] **ANSI C63-4**; (2003). "American National Standard for Methods of Measurement of Radio-Noise Emissions from Low-Voltage Electrical and Electronic Equipment in the Range of 9 Khz to 40 Ghz", *American National Standards Institute (ANSI)*, 2003.